

职业教育课程改革创新规划教材



移动通信 技术及应用

彭利标 主 编



- ★ 本书系统完整地介绍了当前移动通信的新技术、新发展
- ★ 立足于基础，注重联系工程实际，理论分析深入浅出
- ★ 突出应用和工程实践，帮助学生提高分析、解决问题的能力，适合不同层次读者的需要



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

职业教育课程改革创新规划教材

移动通信技术及应用

彭利标 主编

王奉良 李冰玉 田野 参编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书介绍了移动通信、GPS 和蓝牙技术的基本知识,包括移动通信概论,移动通信的主要业务,组网技术和多址技术,移动信道的基本特性,数字信号的基本调制方法,移动通信的信令技术,典型的移动通信系统,如 GSM 系统、CDMA 系统、3G 系统、4G 系统、GPS 系统和蓝牙系统,还介绍了移动系统的安全管理和移动管理,功率控制和小小区切换及通用分组无线业务等。对第三代移动通信系统的三大主流技术,即 WCDMA 技术、CDMA2000 技术、TD-SCDMA 技术标准作了重点分析。对双网双待的概念和 4G 移动通信系统也进行了简单介绍。从应用角度对 GPS 定位测量原理、GPS 定位坐标系统和时间系统进行了详细阐述,列举了 GPS 测量技术设计与外业施测实例,说明了 GPS 定位测量技术应用和测量方法。最后介绍了蓝牙技术原理与协议,蓝牙的物理信道与链路、蓝牙分组与数据通信及蓝牙信息安全等。

本书可作为应用型本科、职业学校通信及信息类专业的教材,也可供从事移动通信系统和 GPS 定位测量技术人员的网络研究、规划、设计、使用、管理和维护的工程技术人员参考。

为方便教师教学,本书还配有电子教学参考资料包,详见前言。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

移动通信技术及应用/彭利标主编. —北京:电子工业出版社,2012.3

职业教育课程改革创新规划教材

ISBN 978-7-121-15818-6

I. ①移… II. ①彭… III. ①移动通信—通信技术—教材 IV. ①TN929.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 016564 号

策划编辑:张 帆

责任编辑:刘真平

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

装 订:北京中新伟业印刷有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1 092 1/16 印张:13.5 字数:363 千字

印 次:2012 年 3 月第 1 次印刷

定 价:25.40 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

前 言

近年来,移动通信技术凭借其自身优越性及相关学科的支持,得到了飞速发展,在人类向信息社会迈进的过程中扮演着越来越重要的角色,移动通信与卫星通信、光纤通信一起构成了长途通信的三大支柱。随着新型器件的产生、新兴技术的应用,新型的移动系统也层出不穷,获得了迅速而全面的发展。

本书系统地阐述了现代蜂窝移动通信的基本原理、基本技术,以及典型的第二代(2G)、第三代(3G)蜂窝移动通信系统,并对第三代蜂窝移动通信系统的演进和双网双待做了介绍,将蓝牙和 GPS 技术合并到本书中,并把移动通信、蓝牙和 GPS 有共性的原理和技术放在一起讲解,减少了内容重复,节约了篇幅。

本书较充分地反映了当前移动通信的新技术。在编写过程中力求理论体系的系统性和完整性,采取概念论述和简单数学推导相结合的方法,循序渐进、由浅入深地对移动通信、GPS 和蓝牙技术的基本知识进行了较深入的讲述。全书共分 8 章,第 1 章移动通信概论,主要介绍移动通信概况,典型移动通信系统,移动通信的发展和应用状况,移动通信的主要业务。第 2 章移动信道及数字调制技术,介绍了无线电波的传播方式,移动无线信道特征,抗信道衰落技术和移动通信的数字调制技术。第 3 章组网技术,主要介绍蜂窝移动通信基本概念,移动通信的多址技术,区域覆盖和频率分配,蜂窝移动通信中的信令技术,移动通信网络结构和越区切换与位置管理。第 4 章 GSM 移动通信系统,主要介绍 GSM 系统的编码方式及应用,无线接口与协议,移动性管理和安全管理,通用分组无线业务等。第 5 章 CDMA 移动通信系统,介绍了 CDMA 的基本原理、CDMA 功率控制及软切换技术、CDMA 系统信道结构和 CDMA 系统的主要业务。第 6 章第三代移动通信系统,介绍了 3G 通信中的 WCDMA 技术、CDMA2000 技术、TD-SCDMA 技术三大主流标准,3G 与 4G 移动通信系统和双网双待基础。第 7 章 GPS 定位测量原理与实施,主要介绍了 GPS 定位坐标系统和时间系统,GPS 定位原理,GPS 测量技术设计与外业施测,GPS 定位测量技术应用。第 8 章蓝牙技术原理与协议,主要介绍蓝牙的物理信道与链路,蓝牙分组与数据通信,蓝牙信息安全,蓝牙技术应用与产品开发等。

本书尽可能反映当前移动通信技术的新技术、新发展,以满足当前和稍长一段时间教学和工作的需要。立足于基础,注重联系工程实际,理论分析深入浅出,文字叙述通俗易懂,图文并茂,注重实用,帮助学生提高分析、解决问题的能力,考虑适合不同层次读者的需要。在讲述中配有例题,突出应用和工程实践,每章后面附有习题,供读者练习和自我检查用,通过练习,帮助读者加深理解。

本书可作为应用型本科、职业学校通信及信息类专业的教材,也可供从事移动通信系统和 GPS 定位测量技术人员的网络研究、规划、设计、使用、管理和维护的工程技术人员参考。

本书的第 1、第 3 和第 8 章由天津理工大学中环信息学院的彭利标编写，第 2 章由王奉良编写，第 4、第 5 章由田野编写，第 6、第 7 章由李冰玉编写。本书由彭利标主编，并负责全书的统稿工作。虽然作者多年来从事移动通信和光纤通信的教学和技术研究，但由于通信技术发展十分迅速，加之作者水平有限，书中难免存在遗漏和错误，敬请读者批评指正。

为了方便教师教学，本书还配有电子教学参考资料包，内容包括电子教案、教学指南及习题答案，请有此需要的教师登录华信教育资源网（www.hxedu.com.cn）下载，或与电子工业出版社联系，我们将免费提供。E-mail:hxedu@phei.com.cn

编 者

2011 年 10 月

目 录

第 1 章 移动通信概论	1
1.1 移动通信概述	1
1.1.1 移动通信的基本概念	1
1.1.2 移动通信的特点	2
1.1.3 移动通信技术中常用到的关键词及含义	3
1.1.4 移动通信的工作频段与工作方式	4
1.2 典型移动通信系统	6
1.2.1 蜂窝移动通信系统	6
1.2.2 无绳电话系统	7
1.2.3 集群移动通信系统	8
1.2.4 移动卫星通信系统	10
1.2.5 其他移动通信系统	12
1.3 移动通信的发展与应用	13
1.3.1 移动通信发展历程及未来发展方向	14
1.3.2 3G 移动通信标准特点	14
1.4 移动通信的业务	17
1.4.1 移动通信的主要业务	17
1.4.2 3G 移动通信的主要业务	17
1.5 习题	19
第 2 章 移动信道及数字调制技术	22
2.1 无线电波的传播方式	22
2.1.1 电波传播方式	22
2.1.2 自由空间的电波传播	23
2.1.3 大气中的电波传播	23
2.2 移动无线信道特征	26
2.2.1 无线信道的概念	26
2.2.2 移动通信信道的多径传播特性	26
2.2.3 移动通信的信道特征	29
2.3 抗信道衰落技术	32
2.3.1 分集接收技术	32
2.3.2 差错控制技术	33
2.3.3 RAKE 接收技术	37

2.3.4 均衡技术	38
2.4 移动通信的数字调制技术	39
2.4.1 数字调制技术的概念	39
2.4.2 数字频率调制	40
2.4.3 数字相位调制	43
2.4.4 MQAM 调制	48
2.5 习题	49
第3章 组网技术	52
3.1 蜂窝移动通信基本概念	52
3.1.1 提高频率资源利用率	53
3.1.2 蜂窝移动电话的工作过程	54
3.2 移动通信的多址技术	56
3.2.1 多址接入方式	56
3.2.2 频分多址 (FDMA) 方式	56
3.2.3 时分多址 (TDMA) 方式	61
3.2.4 码分多址 (CDMA) 方式	63
3.2.5 空分多址 (SDMA) 方式	64
3.3 区域覆盖和频率分配	65
3.3.1 区域覆盖	65
3.3.2 频率分配	66
3.4 蜂窝移动通信中的信令技术	68
3.5 移动通信网络结构	73
3.6 越区切换与位置管理	77
3.6.1 越区切换	77
3.6.2 位置管理	78
3.7 习题	81
第4章 GSM 移动通信系统	84
4.1 GSM 概述	84
4.1.1 GSM 系统的发展历史	84
4.1.2 GSM 系统的特点	85
4.1.3 GSM 系统的网络结构	85
4.1.4 GSM 系统的主要业务	87
4.2 GSM 系统的编码方式及应用	89
4.3 GSM 系统的无线接口与协议	91
4.3.1 GSM 系统信道结构	91
4.3.2 GSM 网络接口	92
4.3.3 GSM 协议结构	93
4.4 GSM 系统的移动性管理	95

4.4.1	位置更新	95
4.4.2	呼叫建立	97
4.4.3	越区切换与漫游	100
4.5	GSM 系统的安全管理	101
4.5.1	鉴权	102
4.5.2	加密	102
4.6	通用分组无线业务	104
4.6.1	高速电路交换数据的概念	104
4.6.2	通用分组无线业务简介	104
4.7	习题	106
第 5 章	CDMA 移动通信系统	109
5.1	CDMA 概述	109
5.1.1	CDMA 的发展	109
5.1.2	CDMA 的特点	110
5.1.3	CDMA 移动通信系统的基本特性	111
5.2	CDMA 的基本原理	111
5.2.1	扩频通信的基本原理	111
5.2.2	常用的扩频方法	112
5.2.3	扩频通信的优点	115
5.2.4	伪随机序列与正交编码	116
5.3	CDMA 功率控制及软切换技术	118
5.3.1	CDMA 系统的功率控制	118
5.3.2	CDMA 系统的软切换	122
5.4	CDMA 系统信道结构	123
5.5	CDMA 系统的主要业务	124
5.5.1	CDMA2000-1X 网络的业务定位	124
5.5.2	CDMA 系统的主要业务	125
5.6	习题	127
第 6 章	第三代移动通信系统	130
6.1	3G 通信概述	130
6.1.1	3G 通信的标准化进程	130
6.1.2	3G 的频谱分配	131
6.1.3	3G 通信的关键技术	133
6.1.4	3G 的主要业务	134
6.2	WCDMA 技术	135
6.2.1	WCDMA 概述	135
6.2.2	WCDMA 系统组成与接口协议	135
6.2.3	WCDMA 信道结构	137

6.3	CDMA2000 技术	138
6.3.1	CDMA2000 概述	138
6.3.2	CDMA2000 无线接口协议	141
6.4	TD-SCDMA 技术	144
6.4.1	TD-SCDMA 概述	144
6.4.2	TD-SCDMA 关键技术	145
6.4.3	TD-SCDMA 系统结构与空中接口技术	146
6.4.4	3 种主流 3G 技术标准比较	147
6.5	B3G 与 4G 移动通信系统	148
6.5.1	B3G 移动通信系统	148
6.5.2	4G 移动通信系统	149
6.6	双网双待基础	151
6.6.1	双网双待的概念	151
6.6.2	双网双待与双卡双待	151
6.7	习题	152
第 7 章	GPS 定位测量原理与实施	157
7.1	GPS 概述	157
7.1.1	卫星定位技术发展概况	157
7.1.2	GPS 的特点	158
7.1.3	GPS 系统组成	159
7.2	GPS 定位坐标系统和时间系统	160
7.2.1	坐标系统	160
7.2.2	时间系统	164
7.3	GPS 定位原理	166
7.3.1	基本原理	166
7.3.2	GPS 定位方法	166
7.4	GPS 测量技术设计与外业施测	167
7.4.1	GPS 测量技术设计依据	167
7.4.2	GPS 控制网的设计及优化	168
7.4.3	GPS 测前准备及技术设计书的编写	170
7.4.4	GPS 测量外业实施	171
7.4.5	技术总结与上交材料	172
7.5	GPS 定位测量技术应用	172
7.5.1	大地测量	172
7.5.2	航空遥感技术	173
7.5.3	灾害预测预报	173
7.5.4	气象、交通、海洋和农业中的应用	173
7.6	习题	174

第 8 章 蓝牙技术原理与协议	177
8.1 蓝牙技术概述	177
8.1.1 蓝牙技术的特点	178
8.1.2 蓝牙协议体系结构	178
8.1.3 蓝牙相关技术	182
8.2 蓝牙的物理信道与链路	185
8.2.1 物理信道	185
8.2.2 物理层链路	187
8.3 蓝牙分组与数据通信	188
8.3.1 蓝牙分组	188
8.3.2 蓝牙的收发规程	190
8.3.3 蓝牙逻辑信道	192
8.3.4 蓝牙的信道控制	193
8.4 蓝牙信息安全	197
8.5 蓝牙技术应用与产品开发	199
8.6 习题	199
参考文献	203

>>> 第 1 章

移动通信概论

- 🏠 1.1 移动通信概述
- 🏠 1.2 典型移动通信系统
- 🏠 1.3 移动通信的发展与应用
- 🏠 1.4 移动通信的主要业务
- 🏠 1.5 习题

自 19 世纪末无线电发明以来，无线通信作为一种新兴的通信技术得到了迅速发展。特别是 20 世纪 70 年代末移动通信网建立以后，移动通信技术经过短短 30 多年的发展，已经成为人类生活中不可缺少的重要组成部分。当前世界移动通信技术已经进入了 3G 的全面运营阶段。在未来，移动个人通信将会得到更加快速的发展。为了让读者对移动通信有初步了解，本章首先给出与移动通信有关的一些概念，对典型的移动通信系统、移动通信的发展、应用及主要涉及的业务范围作简要介绍。

1.1 移动通信概述

当前，移动通信已经成为通信领域中最具有活力、最具有发展前途的一种通信方式，是当今信息社会中最具个性化特征的通信手段，它的发展与普及改变了社会，改变了人类的生活方式。

1.1.1 移动通信的基本概念

移动通信，其本质特色在于“移动”二字，是指通信者双方至少有一方在移动中（或临时停留在某一非预定的位置上）进行信息的传输和交换，包括移动体（如车辆、船舶、飞机、行人、车载机、舰载机等）和移动体之间的通信，移动体和固定点（如固定电话、固定无线电台等）之间的通信。需要指出的是，这里所说的“信息传输与交换”，不仅指双方的语音通信，还包括数据、传真、图像、视频和各种多媒体业务。移动通信不受时间和空间的限制，交流信息机动、灵活、可靠，是信息产业重要的物理基础保证。

1.1.2 移动通信的特点

移动通信技术与其他通信方式相比，主要体现以下特点。

1. 移动通信必须利用无线电磁波进行信息传输

移动通信中的移动终端到基站之间必须靠电磁波，通过无线信道来传送信息，电磁波这种传播媒介允许通信中的用户在一定范围内自由活动，其位置不固定。但是，电磁波的传播特性受到诸多因素的影响。

首先，移动通信的运行环境复杂多变，电磁波传播条件恶劣。随着传播距离的增加，电磁波会发生弥散损耗，并且电磁波传播会受到地形、地物、地貌的遮蔽而发生“阴影效应”。同

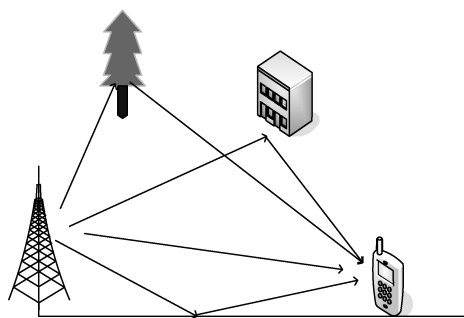


图 1-1 电波的多径传播

时，电磁波是以地面和电离层反射、直射、散射等方式进行传播的，受地形、地物影响很大，而且移动通信系统多建设于城市之内，市内的建筑群或障碍物都使得移动通信传播路径进一步复杂化，这样就造成了信号从多条路径到达接收地点。这些多径信号经过的路径不同，到达接收点的幅度、相位各有差异，它们相互叠加会产生电平衰落和时延扩展。图 1-1 所示为电波的多径传播示意图。

其次，移动通信常常在快速移动中进行，这不仅会引起多普勒（Doppler）频移效应，产生随机调频，而且会使得电波传播特性发生快速的随机起伏，严重影响通信质量。

2. 运行环境复杂多变，干扰大

除了一些常见的外部干扰，如天电干扰、工业干扰和信道噪声之外，系统本身和不同系统之间，还会产生这样或那样的干扰，包括同信道干扰、邻信道干扰、互调干扰、共信道干扰、多址干扰，同时也存在近地无用强信号掩盖远地有用弱信号（称为远近效应）等。因此，在移动通信系统中，如何消除和减少这些有害干扰的影响是至关重要的。

3. 可用频谱资源非常有限，通信业务需求量与日俱增

移动通信可以利用的频谱资源非常有限，不断提高移动通信系统的通信容量，始终是移动通信技术发展中的热点所在。要解决这一难题，一方面要开辟和启动新的频段，另一方面要研究、发展各种新技术和新措施，提高频带利用率。因此，对有限频谱的合理分配和严格管理是有效利用频谱资源的前提，这是国际组织和各国频谱管理机构的重要职责。

4. 系统网络结构多种多样，网络管理和控制必须有效

移动通信网络可以根据不同通信地区的需要配置成带状（如铁路、公路、水路等）、面状（如覆盖某一城市或地区）或立体状（如地面通信设施与中、低轨道卫星通信网络的综合系统）等。移动通信网络既可单网运行，又可多网并行实现互连互通。为此，移动通信网络必须具有很强的管理和控制功能，如用户的登记和定位，通信链路的建立和拆除，信道的分配和管理，通信的计费、鉴权、安全和保密管理，越区切换、漫游控制等。

5. 移动通信设备必须适于移动环境

移动通信设备要求体积小、重量轻、省电、携带方便、操作简单、可靠耐用、维护方便，还要求能保证设备在振动、冲击、高低温环境等恶劣条件下正常工作。

1.1.3 移动通信技术中常用到的关键词及含义

移动通信技术经常提到的关键词及含义如下。

1. 信号

信号 (Signal) 是消息 (Message) 的载体, 一般表现为随时间变化的某种物理量, 而消息是信号的具体内容。在消息中包含一定数量的信息 (Information), 但信息的传送一般都不是直接的, 它必须借助于一定形式的信号 (电信号、光信号、电磁波信号等) 才能传输和进行处理。在移动通信技术中, 我们主要关心的是用做传输信息手段的电磁波信号。

电磁波信号的特性可以从时间特性 (时域) 和频率特性 (频域) 两个方面描述。在时域中, 信号可表示为时间函数的数学表达式, 即电磁波信号是时间 t 的函数, 它具有一定的波形, 有一定的时间特性, 如出现时间的先后、持续时间的长短、重复周期的大小、随时间变化的快慢等。同时, 信号在一定的条件下可以分解为许多不同频率的正弦分量, 即信号具有一定的频率成分, 表现为一定的频率特性。因此, 用于无线通信的电磁波信号既可表示为一个时间的函数, 又可表示为一个频率的函数。

在无线通信中传输的语音、数据和图像的电磁波信号, 其形式可以多种多样, 也存在多种分类方式, 例如, 确定性信号与随机信号、连续信号与离散信号、模拟信号与数字信号、周期信号与非周期信号、能量信号与功率信号等。

模拟信号与数字信号是依据信号的幅度的属性认定的。如果一个信号的幅度在某一时间范围内能取任意值, 这个信号就是模拟信号; 如果一个信号的幅度仅能取得有限个值, 则这个信号就是数字信号。

2. 信噪比

在无线通信系统中, 信号不可避免地要受到噪声的干扰, 噪声对信号的干扰程度用信号与噪声的功率比表示, 即信噪比 (Signal to Noise Ratio, SNR), 用 S/N 或 SNR 来表示, 单位为分贝 (dB)。系统要求接收到的 S/N 值必须大于一定数值, 这样接收端才能滤掉噪声, 分辨出信号。一般来说, S/N 越高, 信号质量越好。信噪比的计算公式如下所示。

$$\text{SNR} = 10 \lg S/N \quad (\text{dB}) \quad (1-1)$$

式中, S 为信号的功率, N 表示噪声的平均功率。按照上述公式, 当 $S=2N$ 时, $\text{SNR}=3\text{dB}$ 。

无线通信系统发射端的功率要受到各种因素的制约, 不能任意提高发射功率, 否则不仅造成不必要的能源浪费, 而且会对其他信号造成干扰。

3. 信号强度

移动通信是无线通信, 它是利用电磁波的辐射与传播, 经过空间来传送信息的通信方式。在讨论信号的电波传播时, 必须定量表示信号的强弱, 因此有必要了解信号强度 (Signal Intensity, SI) 的概念。当信号沿着传输媒介传播时, 其强度会有损耗或衰减, 为了补偿这些损耗, 可以在不同的地点加入一些放大器, 以获得一定的增益。

信号强度最简单的表示方法是用功率, 工程上常用分贝 (dB) 来表示信号的强度, 即

$$\text{SI} = 10 \lg P_2/P_1 \quad (\text{dB}) \quad (1-2)$$

式中, P_2 为信号的功率; P_1 为固定参考信号的功率, 通常 P_1 取 1mW 。信号的功率越大, 其信号强度就越高。

【例 1-1】 某发射机发射的信号功率为 10W , 其信号强度为多少? 当发射功率增大为原来的 2 倍时, 信号强度增加了多少?

解：当信号功率为 10W 时，信号强度

$$SI=10\lg P_2/P_1=10\lg (10W/1mW)=40\text{ (dB)}$$

当发射功率增大为原来的 2 倍 ($2P_2$) 时，则信号强度

$$\begin{aligned} SI_2 &= 10\lg (2P_2/P_1) = 10[\lg 2 + \lg P_2 - \lg P_1] = 10[\lg 2 + \lg P_2/P_1] \\ &= 10\lg 2 + 10\lg P_2/P_1 = 10\lg P_2/P_1 + 3\text{ (dB)} \end{aligned}$$

即信号强度相应地增加了 3dB。

4. 频谱

实际上，一个电磁波信号是由多种频率分量叠加形成的，由傅里叶变换分析可知，电磁波信号可分解为不同频率，而每一个频率分量都是正弦波。

一个信号的频谱 (Frequency Spectrum) 是指它所包含的频率范围。一个信号的绝对带宽是指它的频谱宽度。对于许多信号而言，其绝对带宽是无限的，但是一个信号的绝大部分能量都集中在相当窄的频带内，这个频带称为有效带宽。

1.1.4 移动通信的工作频段与工作方式

频率是无线通信最宝贵的资源之一。为了有效地使用有限的频谱资源，对频率的分配与使用必须严格服从国际和国内有关组织的统一管理，否则将造成互相干扰或频率资源的浪费。

1. 移动通信的工作频段

为了使移动通信所使用的频段不与广播、电视等无线业务相互干扰，工业和信息化部根据国家无线电管理委员会的建议，统一规定了移动通信所使用的频段。

1) 早期我国移动通信使用频段

早期，我国的移动通信主要采用 160MHz、450MHz、800MHz、900MHz 四个频段，如表 1-1 所示。

表 1-1 我国早期移动通信使用的频段

频段分布	频率/MHz	主要应用
160MHz	138~149.9 (移动台发，基站收) 150.05~167 (基站发，移动台收)	早期的专用移动通信，无线寻呼网
450MHz	400~420 (移动台发，基站收) 450~470 (基站发，移动台收)	专用移动通信网 (应急指挥调度系统)
800MHz	825~835 (移动台发，基站收) 870~880 (基站发，移动台收)	集群移动通信系统、CDMA 公用移动通信网
900MHz	890~915 (移动台发，基站收) 935~960 (基站发，移动台收)	GSM 公用移动通信网

在公用陆地移动通信网 (Public Land Mobile Network, PLMN) 中，主要使用 VHF (30~300MHz) 和 UHF (300~3 000MHz) 频段。另外，900MHz 频段中的 806~821MHz 和 851~866MHz 分配给集群移动通信；825~845MHz 和 870~890MHz 分配给部队使用。

2) 部分频段重新规划

1996 年 12 月，国家无线电管理委员会为了满足发展蜂窝移动通信和无线接入的需要，对 2 000MHz 的部分地面无线电业务频率重新进行了规划，分配方案如下。

将 1 800~1 900MHz 分配给 FDD (频分双工)，将 1 900~1 920MHz 分配给 TDD (时分双工)，将 1 960~1 980MHz 用于公众通信网。

将 1 710~1 755MHz 和 1 805~1 850MHz 分配给公众蜂窝移动通信网 1 (1 800MHz) 频段；将 1 865~1 880MHz 和 1 945~1 960MHz 分配给公众蜂窝移动通信网 2 (1 900MHz) 频段。

在已有的频段划分中,已分配给 GSM1800 的频率为 1 710~1 755MHz 和 1 805~1 850MHz,带宽为 90MHz。其中,将下端的 20MHz 分配给中国电信使用,即 1 710~1 720MHz 和 1 805~1 815MHz。另外,还分配了 FDD 无线接入。为满足第三代移动通信系统的频谱要求,FDD 无线接入的频率将逐步回收。

2000 年 6 月,当时的信息产业部对 3 400~3 600MHz 频段又重新进行了规划,规定 FDD 方式固定无线接入系统工作的频段为:终端站发射频段为 3 400~3 430MHz,中心站发射频段为 3 500~3 530MHz,收发频率间隔为 100MHz。

2. 工作方式

无线通信的传输方式分为单向广播式传输和双向应答式传输。无线电寻呼系统属于单向传输,而双向传输有单工、双工和半双工 3 种工作方式。

1) 单工通信传输

单工通信是指通信双方电台交替地进行收信和发信。根据收、发频率的异同,可以分为同频单工和异频单工。

同频单工是指通信双方使用相同的频率进行工作。通信双方发送信息时不接收,接收信息时不发送,平时通信双方的接收机均处于守候状态,天线接到接收机等待被呼。如果某一方需要发话,可按下发话开关,使发射机工作。由于对方接收机处于守候状态,即可实现收信,进行消息传输。这种单工通信工作方式的收发信机是轮流工作的,收发天线可以共用,收发信机中的某些电路也可共用,因而电台设备简单、省电。但这种工作方式只允许一方发送时另一方进行接收,不能同时进行收发工作。例如,在电台甲发送期间,电台乙只能接收而不能发送,这时即使乙方启动发射机也无法通知甲方。另外,通信双方的任何一方当发话完毕,必须立刻松开发话开关,否则接收不到对方发来的信号。

异频单工通信方式是指收发信机使用两个不同的频率分别进行发送和接收。例如,电台甲的发射频率和电台乙的接收频率为 f_1 ,电台乙的发射频率和电台甲的接收频率为 f_2 。但同一部电台的发射机与接收机还是轮换工作的,异频单工与同频单工的差异仅仅在于收发频率的异同。单工通信常用于点到点通信,如安保人员使用的对讲机就是典型的单工通信设备。

2) 双工通信传输

双工通信是指通信双方可以同时进行信息的发射与接收,有时也称为全双工通信。双工通信一般使用一对频道,以实施频分双工(FDD)工作方式。这种工作方式使用方便,发射和接收可同时进行。但是在电台的运行过程中,发射机总是处于工作状态,电源消耗较大,这对于用电池作为电源的移动台很不利。

为缓解这个问题和降低对系统频带的要求,可在通信设备中采用同步的时分双工(TDD)通信方式。此时,时间轴被周期地分割成时间帧,每一帧分为两部分,前半部分用于移动台发送,后半部分用于基站发送,这样就可以实现移动台与基站的双向通信。

3) 半双工通信传输

如果移动台采用单工方式工作,即按下发话开关,发射机才工作,松开发话开关,发射机终止工作,而接收机总是工作的,则基站工作情况与全双工完全相同,称为半双工通信方式。其优点是:设备简单,功耗小,克服了单工通话断断续续的现象,但操作仍不太方便,所以半双工制主要用于专业移动通信系统中,如汽车调度等。

移动通信应用范围不断扩大,系统的类型也越来越多,下面介绍几种典型的移动通信系统。

1.2.1 蜂窝移动通信系统

初期的移动通信系统采用大区制,在其覆盖区中心设置大功率发射机,采用高架天线把信号发送到半径可达几十公里的整个覆盖区域。这种系统能够提供给用户使用的信道数极为有限,远远满足不了移动通信业务迅速增长的需要。

1. 小区制

20 世纪 70 年代,美国贝尔实验室提出了蜂窝网的概念。蜂窝通信网络把整个服务区划分为若干个小区,每个小区用小功率发射机进行覆盖,许多小区就像蜂窝一样覆盖任意形状的服务区,如图 1-2 所示。

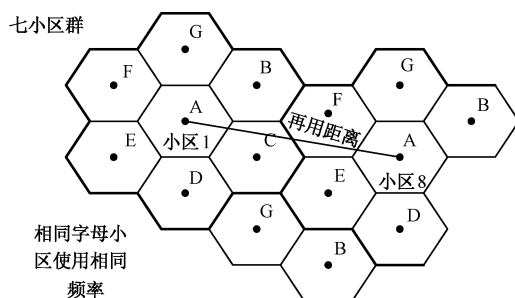


图 1-2 小区覆盖示意图

2. 频率再用技术

一般来说,相邻的两个小区不能使用相同的频道,否则会发生同道干扰。但由于各个小区通信时所使用的功率较小,任意两个小区之间的空间距离只要超过某一数值,即使使用相同的频道,也不会产生显著的同道干扰。因此,可以把若干相邻的小区按一定数目划分成区群,同一区群的不同用户在同一时间不能占有相同的频道,但任意两个区群内可以存在同频小区,同频小区的用户可以同时使用相同的频道进行通信而不会产生显著的同道干扰,这种技术称为频率再用。图 1-2 中采用七小区群制,图中相同字母小区可采用相同的频率。另外,还可采用九小区群制、十二小区群制等。频率再用技术是蜂窝移动通信的基本技术之一,它是蜂窝移动通信系统解决用户增多而受到有限频谱制约的重大突破。

3. 小区分裂技术

通常小区越小,单位面积所容纳的用户数越多,则频谱利用率越高。因此,当用户数增多到小区所能服务的最大限度时,可以把这些小区分割成更小的蜂窝状区域,并相应减小新小区基站的发射功率,再继续采用相同的频率再用模式,分裂后的新小区能支持和原小区同样数量的用户,也就进一步提高了系统单位面积可服务的用户数。当分裂后的新小区所能支持的用户数又达到饱和时,还可以将这些新小区再进行分裂,以适应持续增长的业务需求,这种将小区

逐渐变小的过程称为小区分裂。小区分裂是为适应业务需求的增长而逐步提高其容量的独特方式。

但小区不能无限分裂，一方面是因为小区基站的建设费用昂贵，尤其是在市内建设基站占用的资源十分昂贵。另一方面，小区分裂导致小区变小，频率再用距离缩短，相邻区群的同频小区之间的同道干扰增强，有可能会使同道干扰大于预定的门限值，使通信质量恶化。只有频率再用距离足够大，才能保证这种同道干扰低于预定门限值，这也就限制了小区不能无限分裂。

4. 越区切换技术

当移动用户在蜂窝服务区中快速运动时，用户之间的通话常常不会在一个小区中结束。快速行驶的汽车在一次通话的期间内可能跨越多个小区。当移动台从一个小区进入另一相邻小区时，其工作频率及基站与移动交换中心所用的接续链路必须从它离开的小区转换到正在进入的小区，这一过程称为越区切换。整个切换过程自动完成，通话用户并不知道，也不会中断行进中的通话。越区切换过程如图 1-3 所示，当移动用户从蜂窝 B 越区到蜂窝 A 时，切换在移动交换中心的控制下进行。

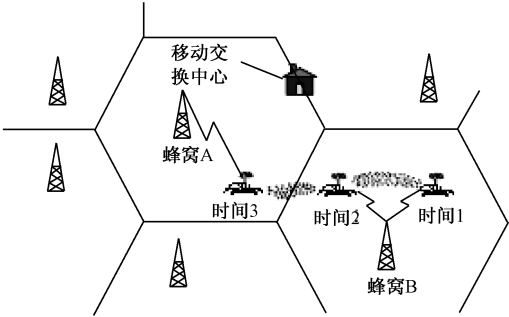


图 1-3 越区切换过程

越区切换必须准确可靠，且不影响通信中的语音质量，它是蜂窝移动通信系统中的关键技术。移动台的运动速度越快或小区半径越小，通信中的越区切换就越频繁。越区切换过于频繁不仅增加切换控制难度，也导致系统附加开销增大。

1.2.2 无绳电话系统

无绳电话是一种以有线电话网为依托的通信方式，也可以说它是有线电话网的无线延伸。它具有发射功率小、省电、设备简单、价格低廉、使用方便等优点，因而发展十分迅速。以 PHS 技术为基础的“小灵通”数字无绳电话系统在我国得到了广泛的应用。

1. 无绳电话

无绳电话是指用无线信道代替普通电话线，在限定的业务区内，给无线用户提供移动或固定公共交换电话网业务的电话系统，它是一种无线接入系统。由一个或若干个基站和多部手机组成，允许手机在一组信道内任选一个空闲信道进行通信。

简单的无绳电话机把普通的电话单机分成座机和手机两部分，座机与有线电话网连接，手机与座机之间利用无线方式进行连接，允许携带手机的用户在一定范围内自由活动，如图 1-4 所示。

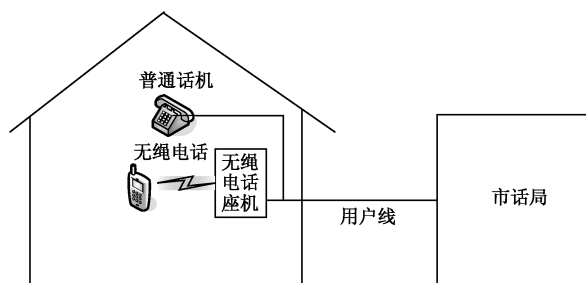


图 1-4 无绳电话系统示意图

2. 无绳电话的发展

无绳电话自 20 世纪 70 年代发展至今,经历了 CT0、CT1、CT2、CT3、DECT 等几个阶段。

第一代无绳电话 (CT1) 为模拟无绳电话系统。它存在一些固有的缺陷,例如,频谱利用率低,信道数目少,服务范围小,相互干扰严重,音质差,难以保密,不易进行数据通信等。

第二代无绳电话 (CT2) 是第一个数字无绳电话标准,紧接着北美、日本都有了自己的数字无绳电话标准。CT2 不仅适用于家庭、办公室等室内场合,还可以用于公共场合,它采用语音编码、时分双工 (TDD) 等数字技术,通话质量较高,保密性强,抗干扰性好,克服了模拟无绳电话存在的一些固有缺陷,但 CT2 无越区切换和漫游功能。

1992 年,欧洲电信标准协会 (ETSI) 推出了欧洲数字无绳电话系统 (DECT) 新一代数字无绳电话标准。1993 年,日本推出了个人便携电话系统 (PHS)。1994 年美国通信委员会的联合技术委员会通过了个人接入通信系统 (PACS)。这些数字无绳电话系统具有容量大,覆盖面宽,支持数据通信、越区切换、漫游,应用灵活等特点,已成为目前无绳电话的主流。

1999 年,国际电信联盟 ITU-R 将 DECT 数字无绳电话作为 IMT-2000 的无绳通信标准。由于 IMT-2000 标准充分体现了第三代移动通信网络对于带宽和移动性的需求,而数字无绳电话标准充分考虑了前向兼容性,协议体系能够提供不断演进的应用和服务,因而能够迅速拓宽带宽,适应多媒体业务的需求。

1.2.3 集群移动通信系统

集群移动通信系统属于调度系统的专用通信网,它采用多信道共用和动态分配信道的技术,主要以无线用户为主,即以调度台与移动用户之间的通话为主。

1. 集群移动通信

集群的含义是指无线信道不是仅给某一个用户群专用,而是若干个用户群共同使用。集群移动通信系统采用的基本技术是频率共用技术。它的基本做法是:移动用户在通信过程中不是固定地占用某一个信道,而是按下发话开关后才能占用某一个信道进行通话,一旦松开发话开关,信道将被释放,变成空闲信道,允许其他用户占用该信道。此外,为了提高系统的频带利用率,以便在有限的频段内为更多的用户服务,集群移动通信系统除具有限时通话的功能外,还把一些由各部门分散建立的专用通信网集中起来,统一建网和管理,并动态地分配信道,以便容纳数目更多的用户。

集群移动通信系统同蜂窝移动通信系统相比,在技术上有很多相似之处,但在主要用途、网络组成、工作方式等方面也存在很大差异,如表 1-2 所示。

表 1-2 集群移动通信与蜂窝移动通信的差异

系统 区别	集群移动通信系统	蜂窝移动通信系统
1	属于专用通信网，各用户有优先等级	属于公众移动通信网，不分优先等级
2	主要业务是无线用户间的通话	有大量业务是无线用户和有线用户之间的通话
3	根据调度业务特征，有限时通话功能，一次通话限定时间为 15~16s	不限时
4	一般采用半双工工作方式，一对移动用户间通话只占一对频道	采用全双工工作方式，一对移动用户间的通话必须占用两对频道
5	适用于共用频道较少的中小容量的单区通信网	采用频道再用技术来提高系统的频率利用率

随着通信技术的发展，上述两种系统的特征都会不断地发生变化，其中有许多技术甚至可以相互借鉴，但公用网和专用网的服务要求与运行环境不同，因而各有其不同的发展方向和发展策略，在某一个系统中行之有效的功能在另一个系统中不一定适用。

2. 集群移动通信网络的基本结构

在集群网络的基本结构中，包含移动台、调度台、基站转发器、系统管理终端及有关的部分，如图 1-5 所示。

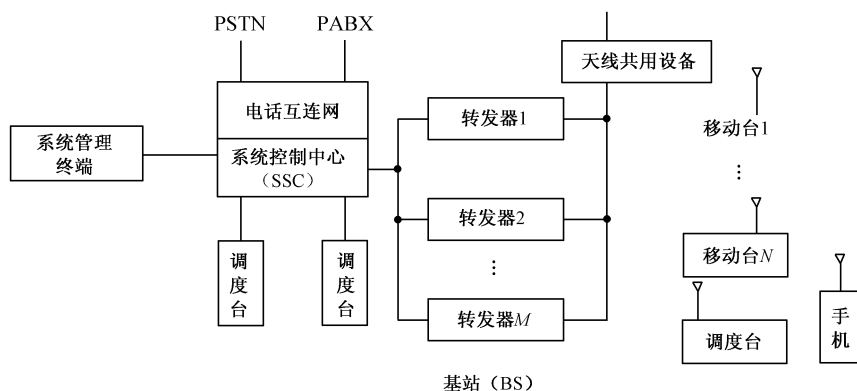


图 1-5 集中控制方式的集群通信系统的基本结构

集群系统的基本设备如下。

(1) 转发器。由收/发信机和电源组成。每个频道均配一个转发器。

(2) 天线共用设备。包括天线、馈线和共用器（如收发天线共用器、基站的发射合路器和接收耦合器）。

(3) 系统控制中心。分布式控制系统虽无集中控制中心，但在联网时，可通过无线网络控制终端。

(4) 调度台。调度台可分为无线调度台和有线调度台。无线调度台由收/发信机、控制单元、操作台、天线和电源等组成。有线调度台可以是简单的电话机或带显示的操作台。

(5) 移动台。移动台有车载台和手持机。它们均由收/发信机、控制单元、天线和电源等组成。

1.2.4 移动卫星通信系统

移动卫星通信系统是利用通信卫星作为中继站,为移动用户之间或移动用户与固定用户之间提供电信业务的系统,其通信过程示意图如图 1-6 所示。处于地球表面(陆地或海洋)的地球站 A、B、C、D、E……之间是靠地球卫星的转发进行通信。

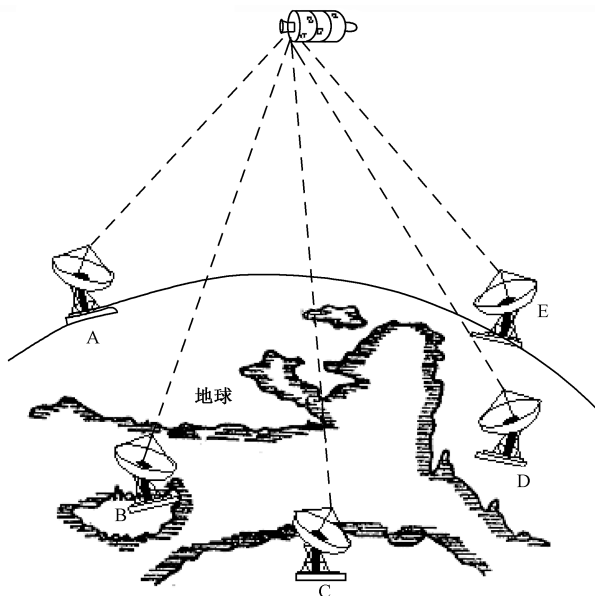


图 1-6 移动卫星通信系统示意图

1. 移动卫星通信系统的特点

卫星通信系统利用卫星中继,在海上、空中和地形复杂而人口稀疏的地区实现移动通信,具有独特的优越性。与蜂窝移动通信系统相比,移动卫星通信系统增加了卫星中继站,通过中继站延长了通信距离,扩大了用户活动范围。从某种意义上说,移动卫星通信系统是蜂窝移动通信系统的延伸和扩大。

2. 移动卫星通信系统的基本组成及其工作过程

移动卫星通信系统主要包括发端地面站、收端地面站、上行链路、下行链路和通信卫星五大部分,如图 1-6 和图 1-7 所示。在地面站内,要构成双工通信工作方式,既要向卫星发射信号,又要接收从卫星转发其他地面站送给本站的信号。卫星通信系统的工作过程如图 1-8 所示。

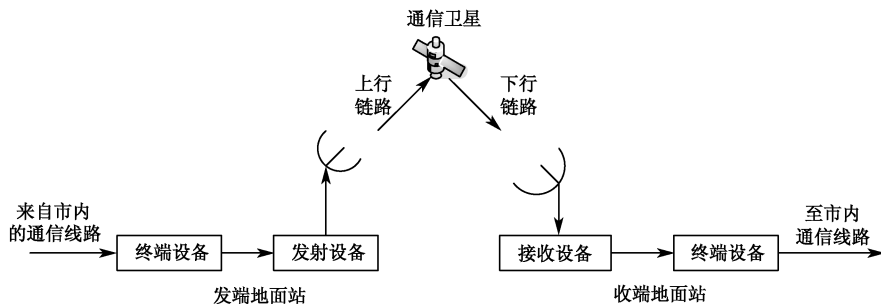


图 1-7 卫星通信线路的组成

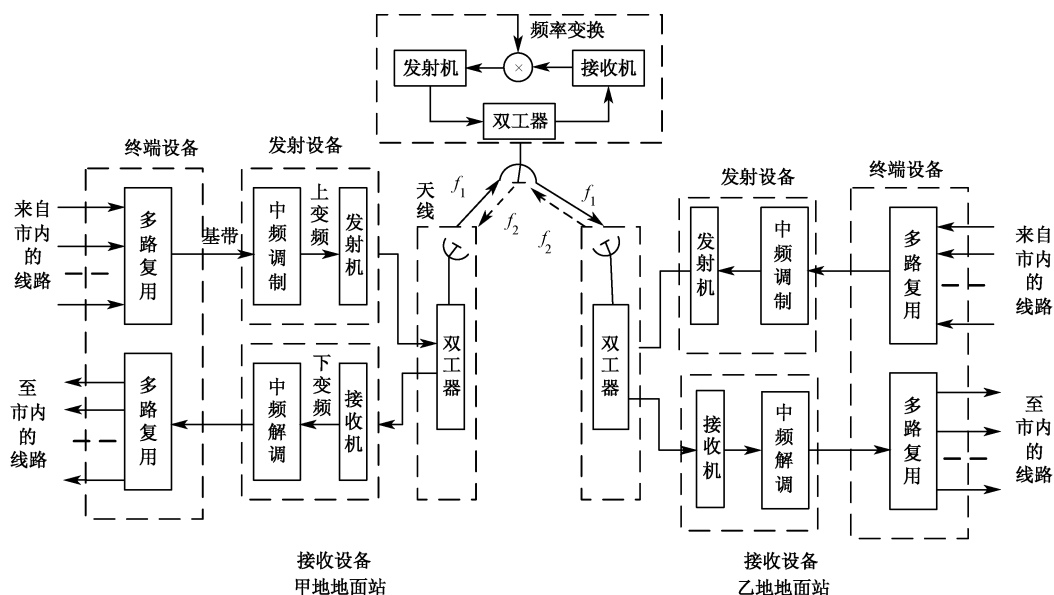


图 1-8 卫星通信系统的工作过程

当甲地一些用户要与乙地的某些用户通话时，甲地首先要把本站的信号变换成基带信号，经过调制器变换为中频信号（70MHz），再经上变频变为微波信号，经高功率放大器放大后，由天线发往卫星（上行信号）。卫星收到地面站的上行信号，经放大处理，变换为下行的微波信号。乙地收端地面站收到从卫星传送来的信号（下行信号），经低噪声放大器、下变频、中频解调，还原为基带信号，并分路送到各用户，完成甲端到乙端地面站信号的传输过程。乙地终端站发往甲地的信号过程与此相同，只是上行线、下行线的频率不同而已。

3. 移动卫星通信系统的特点

与其他通信系统相比，移动卫星通信系统具有以下特点。

(1) 覆盖面积大，通信距离远。一颗静止卫星可最大覆盖地球表面 1/3，三颗同步卫星可覆盖除两极外的全球表面，从而实现全球通信。

(2) 设站灵活，容易实现多址通信。

(3) 通信容量大，传送的业务类型多。

(4) 卫星通信一般为恒参信道，信道特性稳定。

(5) 电路使用费用与通信距离无关。

(6) 建站快，投资省。

卫星通信不足之处主要表现为：

(1) 要求卫星严格，有高可靠性、长寿命。

(2) 通信地面站设备较复杂、庞大。

(3) 卫星传输信号有通话延迟感。

4. 卫星通信系统的几种轨道形式

地球卫星都有自己的运行轨道，这种轨道有圆形，也有椭圆形。轨道所在的平面称为轨道面，轨道面都要通过地心，如图 1-9 所示。

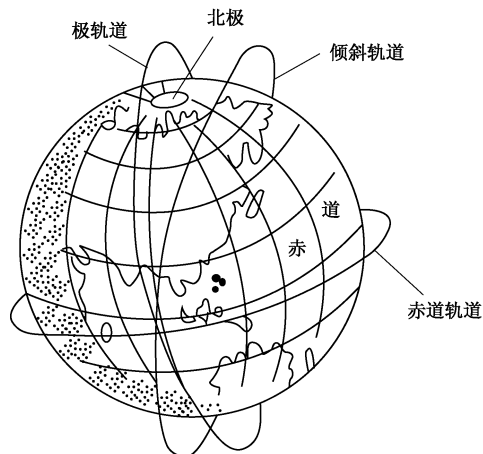


图 1-9 地球卫星的几种轨道

当卫星的轨道平面与赤道平面的夹角为 0° 时, 地球卫星的轨道称为赤道轨道; 当卫星轨道平面与赤道平面夹角为 90° 时, 卫星的轨道称为极轨道; 当卫星轨道平面与赤道平面夹角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间时, 卫星轨道称为倾斜轨道; 当卫星运行轨道在赤道面内时, 称为赤道轨道。如轨道呈圆形, 离地面高度为 357 866km 时, 此轨道称为同步轨道。同步轨道只有一个, 是宝贵的空间资源。

在同步轨道上运行的卫星, 其运行方向与地球自转方向相同, 由西向东做圆周运动, 卫星运行周期为恒星日 (23 小时 56 分 4 秒), 一般认为 24 小时。它的匀速运动速度为 3.07km/s, 这时卫星相对于地球表面呈静止状态, 在地球上观察卫星时, 此卫星是静止不动的, 把这个卫星叫做同步卫星或静止卫星, 这个轨道也称为静止轨道。

移动卫星通信系统种类很多, 可以根据应用领域、卫星轨道高度、提供的主要业务、卫星覆盖面等因素进行划分。通常按卫星轨道高度的不同, 可分为高、中、低轨道移动卫星通信系统。中、低轨道移动通信卫星系统不能与地球自转保持同步, 从地面上看, 卫星总是缓慢移动的。如果要求地面上任一地点的上空在任一时刻都有一颗卫星出现, 就必须设置多条卫星轨道, 每条轨道上均有多颗卫星有顺序地在地球上空运行。卫星之间通过星际链路互相连接, 这样就构成了环绕地球上空、不断运动但能覆盖全球的卫星中继网络。

低轨道移动卫星通信系统 (LEO) 一般都由多颗卫星组成卫星通信网。卫星离地面高度在 1 000km 左右, 其运转周期一般为几小时。低轨道移动卫星通信系统使用的卫星体积小、重量轻、发射容易、成本低, 如铱卫星通信系统等。

中轨道移动卫星通信系统 (MEO) 的轨道高度在 10 000km 左右, 发射十多颗卫星, 就可完成全球通信任务。为了提高对地面的辐射功率, 卫星上采用了多波束覆盖和频率再用技术, 如海事卫星 (INMARSAT) 系统和 Qbyssey 系统等。

在 2000 年开通的阿斯特罗全球宽带卫星通信系统就是高轨道全球移动卫星通信系统 (GEO), 它由 9 颗新一代的高轨道全球卫星组成, 向全球提供多媒体、互联网高速接入及私人公司的数据网络接入业务。此外, 美国的 Qualcomm 系统也属于高轨道全球卫星通信系统。

1.2.5 其他移动通信系统

除了上述典型的移动通信系统外, 业内人士也将蓝牙技术和 GPS 系统列为移动通信系统。

1. 蓝牙技术

当今, 世界范围内电子设备技术高速发展, 瑞典的爱立信公司于 1994 年成立了一个专项科研小组, 对移动电话及附件的低能耗、低费用无线连接的可能性进行研究, 其最初目的在于建立无线电话与 PC 卡、耳机及桌面设备等产品的连接。

1) 蓝牙技术具有巨大的潜在市场

随着蓝牙技术研究的不断深入, 科研人员越来越感到这项技术所独具的个性和巨大的商业潜力, 同时也意识到凭借一家企业的实力根本无法继续研究, 于是, 爱立信将其公诸于世, 并极力说服其他企业加入到它的研究中来。它们共同的目标是建立一个全球性的小范围无线通信技术, 并将此技术命名为“蓝牙”, 来表达要将这种全新的无线传输技术在全球推广, 并实现全球通用的雄心。

1998 年 2 月, 爱立信、诺基亚、IBM、东芝及 Intel 组成了蓝牙利益集团 (SIG), 这个集团包含了商业领域的最佳组合, 构成了两个最大的移动通信公司, 两个最大的手提电脑生产商, 一个数字信号处理技术的领导者。之后, 蓝牙引起了越来越多企业的关注。1999 年 11 月, 比

尔·盖茨专程到拉斯维加斯一间只有 11 名员工的小公司访问，只因这家公司已研制成功一种含蓝牙技术的胸卡，随后，微软便宣布加入 SIG。目前，包括索尼、惠普、戴尔在内的 2 000 多家公司都签署了相关协议，共享这一先进技术。这说明基于此项蓝牙技术的产品具有广阔的应用前景和巨大的潜在市场，没有人会否认它所代表的无线通信联络的时代潮流。

2) 蓝牙技术特点

蓝牙技术具有如下特点。

(1) 蓝牙最突出的魅力在于其“简单易用”的特点。通信时操作顺序很简单，由配备了蓝牙设施的通信设备搜索出位于半径 10m 以内的另外一台配备蓝牙的设备，经过双方认证后就可以进行通信。

(2) 在通信速度及通信距离方面，与无线 LAN 的 IEEE 802.11b 传输速度 11Mbps、距离 50m 相比，蓝牙的传输速度为 1Mbps，但通信距离只有 10m。

(3) 价格是蓝牙面临的主要问题，价格相对较高仍然是蓝牙产品的一大特点。由于该项技术的综合成本很高，因而导致一些嵌入蓝牙技术模块设备的成本增高。

(4) 通信距离极其有限。蓝牙无线通信有效距离较短，一般为 10m 左右，这也是目前蓝牙技术迫切需要研究和解决的一大方向。

(5) 蓝牙的传输速度并不是最快，而且人们普遍认为蓝牙技术存在兼容性和安全性差的缺点。

2. GPS 技术

GPS 作为继子午卫星系统发展起来的新一代卫星导航与定位系统，具有全球性、全天候、连续性等优点的三维导航和定位能力，以及具有良好的抗干扰性和保密性。它已成为美国导航技术现代化的最重要标志，并被视为 20 世纪美国继阿波罗登月计划和航天飞机计划之后的又一重大科技成就。

1) GPS 技术的应用

GPS 技术最初主要用于建立各种类型和等级的测量控制网，尤其在各种类型的测量控制网的建立方面，GPS 定位技术已基本上取代了常规测量手段，成为主要的技术手段。目前它除了仍大量用于测量领域外，其他方面也得到了充分的应用，例如各种类型的施工放样、测图、变形观测、航空摄影测量、海测和地理信息系统中地理数据的采集等。

2) GPS 的特点

GPS 系统具有高精度、全天候、高效率、多功能、操作简便、应用广泛等特点。单机定位精度优于 10m，采用差分定位，精度可达厘米级和毫米级。

1.3

移动通信的发展与应用

自 19 世纪 80 年代赫兹发现电磁波后，意大利的马可尼和俄国的波波夫于 1894 年发明了无线电，1897 年马可尼第一次成功演示海上航行船舶间的无线通信，开创了无线移动通信的先河。而现代移动通信技术的发展始于 20 世纪 20 年代，是 20 世纪的重大成就之一。在不到 100 年的时间里，随着计算机和通信技术的发展，移动通信得到了举世瞩目的发展，其发展速度令人惊叹。当前，移动通信已成为人们生活中不可缺少的一部分。第二代移动通信系统（2G）向

第三代移动通信系统（3G）的演进，促进了技术融合，促进了全球统一标准的形成。随着 3G 服务的提供，移动电话的普及率将进一步扩大，各项新技术的应用也必将推动下一代宽带移动通信系统不断向前迈进。

1.3.1 移动通信发展历程及未来发展方向

1. 移动通信的几个发展阶段

现代移动通信系统的发展大致经历了以下几个阶段。

20 世纪 20 年代到 40 年代，为移动通信发展的早期阶段。在这期间，首先在短波几个频段上开发出专用移动通信系统，其代表是美国多个城市警察使用的调幅（AM）制式的车载移动通信系统。该阶段可以认为是现代移动通信的起步阶段。

20 世纪 40 年代中期到 60 年代初期，公用移动通信业务开始问世。美国、德国、法国、英国相继研制成功了公用移动电话系统。美国贝尔实验室完成了人工交换系统的接续问题。香农在其“通信的数学理论”一文中预言了信号通过信道传输的最佳方式是数字通信，为数字通信的产生与发展奠定了理论基础。

20 世纪 60 年代中期到 70 年代中期，美国推出了大区制的 IMTS 系统（改进型移动电话系统），能够实现自动选频和自动接续，缺点是容量太小。德国也推出了类似系统。

20 世纪 70 年代到 80 年代中期是移动通信大发展的时期。20 世纪 70 年代末，美国研制成功了 AMPS 系统（先进的移动电话系统），并建成了世界上第一个蜂窝移动通信系统，AMPS 系统于 1983 年投入商用。日本的 NTT 系统、英国的 TACS 系统、北欧四国的 NMT 系统也相继研制成功并投入商用。蜂窝移动通信系统成为实用系统并在世界各地迅速发展，形成了第一代移动通信系统。

20 世纪 80 年代中期到 20 世纪末，是数字移动通信系统发展和成熟的时期。以 AMPS 系统和 TACS 系统为代表的第一代模拟移动通信系统虽然得到迅猛发展，并取得了很大成功，但也暴露了很多问题。例如，频谱利用率低，设备复杂，成本较高，其安全性差，易被窃听，业务种类受限制，通信容量小等，不能满足日益增长的移动用户的需求。由此产生了第二代移动通信系统（2G）。它以数字化为主要特征，其中最具有代表性的是欧洲的时分多址（TDMA）GSM 系统、美国的码分多址（CDMA）IS-95 系统和双模 D-AMPS 系统，还有日本的 PDC 系统等，这些系统均于 20 世纪 90 年代初投入商用。

2. 3G、4G 移动通信系统

自 2000 年开始，伴随着第三代移动通信系统（3G）的大量论述，以及 2.5G 产品 GPRS 系统的过渡，3G 走上了移动通信舞台的前沿，于 21 世纪初期投入商用。当前，移动通信技术的发展呈现加快趋势，当第三代移动通信系统方兴未艾之时，第四代移动通信系统（4G）的讨论已经如火如荼地展开，国际上通信技术发达的国家已着手制定 4G 的标准和产品，部分国家的标准已提交国际电信联盟（ITU），目前正在标准化。从技术上看，4G 系统在 3G 业务多媒体化的基础上，以无缝灵活支持高速宽带无线互联网业务为主要目标，打破蜂窝网结构，引入网络动态特性，并能做到在任何地方宽带接入互联网，实现多网融合。

1.3.2 3G 移动通信标准特点

第三代移动通信系统（3G）最早于 1985 年由国际电信联盟（ITU）提出，当时称为未来公众陆地移动通信系统（FPLMTS），1996 年更名为 IM-2000（国际移动通信-2000），其含义是

在 2000 年左右投入商用并工作在 2 000MHz 频段上的国际移动通信系统。它以多媒体业务为主要特征,把语音通信与多媒体通信结合起来,能够提供图像、音乐、网页浏览、视频会议等信息服务。3G 不同于采用 TDMA 技术和电路交换技术的 2G,它以 CDMA 技术和分组交换技术为基础,能支持更多的用户,提供更高的传输速率。1999 年 11 月 5 日在芬兰赫尔辛基召开的 ITU (国际电信联盟) TG8/1 第 18 次会议上最终确定了 3 类 (TDMA、CDMA-FDD、CDMA-TDD) 共 5 种技术标准,作为第三代移动通信的基础。其中 WCDMA、CDMA2000、TD-SCDMA 是 3G 的三大主流标准。ITU 在 2000 年 5 月批准了针对 3G 网络的 IMT-2000 无线接口的 5 种技术标准,如表 1-3 所示。

表 1-3 IMT-2000 无线接口的 5 种技术标准

多址接入技术	正 式 名 称	习 惯 称 呼
CDMA 技术	IMT-2000 CDMA-DS	WCDMA
	IMT-2000 CDMA-MC	CDMA2000
	IMT-2000 CDMA-TDD	TD-SCDMA/UTRA-TDD
TDMA 技术	IMT-2000 TDMA-SC	UMC-136
	IMT-2000 TDMA-MC	P-DECT

1. WCDMA 标准

IMT-2000 CDMA-DS 又称宽带码分多址 (WCDMA),其核心网基于演进的 GSM/GPRS 网络技术,空中接口采用直接序列扩频 (DS),此标准同时支持 GSM MAP (GSM 移动应用部分)和 ANSI-41 两个核心网络。欧洲的爱立信公司作为主要厂家,最先对 WCDMA 技术进行技术研发,日本于 1994 年开始 IMT-2000 无线传输技术的研究,最后确定将 NTT 公司的 CDMA 综合 FDD/TDD 方式作为日本的方案,最终爱立信和 NTT 达成一致协议,进行技术融合,形成了现在的 IMT-2000 CDMA-DS。目前这种方式得到了欧洲、北美、亚太地区各 GSM 运营商和日本、韩国多数运营商的广泛支持,是第三代移动通信三大主流标准之一。

WCDMA 技术有如下特点:可适应多种速率的传输,灵活地提供多种业务;基站收/发信机 (BTS) 之间可以不用全球定位系统 (GPS) 同步;优化的分组数据传输方式;支持不同载频之间的切换;上、下行快速功率控制;反向采用导频辅助的相干检测;充分考虑了信号设计对电磁兼容的影响。

2. CDMA2000 标准

IMT-2000 CDMA-MC 又称 CDMA2000,它是北美的朗讯、摩托罗拉、北电及韩国三星等公司联合提出来的基于 CDMAOne 的系统方案。CDMAOne 是基于 IS-95 标准的各种 CDMA 制造厂家的产品和不同运营商的网络构成的一个家族概念,也是国际 CDMA 发展组织的一个品牌名称。从 CDMAOne 演进的 CDMA2000 标准是一个体系结构,称为 CDMA2000 Family,它包含一系列子标准,经过融合后只含多载波 (MC) 方式,即单载波 (1X)、三载波 (3X) 等。此标准同时支持 GSM MAP 和 ANSI-41 两个核心网络。

CDMA2000 沿用了 IS-95 的主要技术和基本技术思路,可以后向兼容。由 CDMAOne 向 3G 演进的途径为:CDMAOne (IS-95、IS-95A、IS-95B)、CDMA2000-1X (3X)、CDMA2000-1X-EV。其中,从 CDMA2000-1X 之后属于 3G 技术。

3. TD-SCDMA 标准

TD-SCDMA (Time Division Synchronous CDMA) 时分-同步码分多址, 是我国提出的国际标准。UTRA-TDD 是通用陆地无线接入时分双工, 该标准的制定目前陷入停顿状态, 所以 IMT-2000 CDMA-TDD 常指 TD-SCDMA。

TD-SCDMA 系统的关键技术包括智能天线技术、联合检测技术、同步 CDMA 技术、接力切换技术、动态信道分配技术。

TD-SCDMA 有如下优势。

(1) 频谱灵活性和支持蜂窝网的能力。采用 TDD 方式, 仅需要 1.6MHz (单载波) 的最小带宽, 频谱安排灵活, 不需要成对的频率, 能较好解决当前频率资源紧张的矛盾。若带宽为 5MHz, 则可支持 3 个载波, 在一个地区可组成蜂窝网, 支持移动业务。

(2) 大容量和广覆盖。TD-SCDMA 采用了联合检测、智能天线、快速功率控制等技术, 可降低多径衰落, 并使发射机的发射功率总是处于最小水平, 采用接力切换, 降低了网络资源消耗, 提高了全网容量, 覆盖范围广。

(3) 高的频谱利用率。采用 TDD 方式, 不需要分配成对的上、下行频谱, 可有效利用频率资源, 比其他 3G 多了一种多址方式, 且采用智能天线技术, 相同的频带内基本信道数更多, 频谱利用率更高, 在 3 个主流标准中具有最高的频谱效率。

(4) 适合上、下行不对称业务的开展。TD-SCDMA 采用了 TDD 技术, 可以通过灵活配置上、下行时隙转换点, 改变上、下行时隙数, 尤其适合目前互联网、视频点播等不对称业务的实现。

(5) 适用于多种使用环境, 设备成本低。TD-SCDMA 系统性价比高。它具有我国自主知识产权, 在网络规划、系统设计、工程建设、长期技术支持等方面带来方便, 大大节省建设和运营成本。3G 三大主流技术标准比较如表 1-4 所示。

表 1-4 3G 三大主流技术标准比较

项 目	TD-SCDMA	WCDMA	CDMA2000
载波间隔	1.6MHz	5MHz	1.25MHz
码片速率	1.28Mc/s	3.84Mc/s	1.228 8Mc/s
双工方式	TDD	FDD	FDD
多址方式	CDMA+TDMA+FDMA	CDMA+FDMA	CDMA+FDMA
调制方式	QPSK 和 8PSK	HPSK (上行) QPSK (下行)	BPSK (上行) QPSK (下行)
功率控制频率	上、下行: 200Hz	上、下行: 1 500Hz	上、下行: 800Hz
基站间同步	同步	同步或异步	需用 GPS 同步
切换方式	硬切换+接力切换	硬切换+软切换	硬切换+软切换

第三代移动通信系统要求最大限度地利用频带, 在提供大容量传统业务的同时, 支持高质量和多速率的多媒体业务, 能运行在多种通信环境和多种通信网络中, 关于 3G 的具体内容将在本书后续章节中详细介绍。

1.4

移动通信的业务

移动通信的业务是指移动通信系统为了满足用户的通信需求而提供的服务。随着移动通信的不断发展,移动通信的业务种类更加丰富多样,而且不同的系统其业务类型有所不同。但其基本业务包括语音通话业务、短消息业务、语音信箱服务和传真、数据通信业务、人工查询业务、来电显示和呼叫限制等。

1.4.1 移动通信的主要业务

以 2G 系统为例,简单介绍移动通信的主要业务。

1. 语音通话业务

语音通话业务是移动通信系统的最基本业务。系统为移动用户间或移动用户与固定用户之间提供实时的双向通话。紧急呼叫业务是提供在紧急情况下的一种简单拨号方式,接至最近紧急服务中心的特殊服务业务。

2. 短消息业务

点对点短消息业务。它利用呼叫状态或空闲状态,由控制信道传送,信息量一般较小。可分为移动台 (MS) 发送的短消息业务和移动台 (MS) 接收的短消息业务,还包括小区广播式的短消息业务,即网络在某一特定区域,以一定间隙向移动用户广播通用消息,也是利用控制信道进行传送。

3. 人工查询业务

可以拨打该系统的免费查询电话,例如中国移动的 10086,中国联通的 10010 进行查询服务,如话费查询、业务查询、办理或取消业务、紧急停机等。

4. 语音信箱业务

语音信箱是存储声音信息的设备,按语音信息归属的用户进行存储,用户可根据需要随时提取。在其他用户呼叫某用户而不能接通时,可将声音存入此用户的语音信箱,或直接拨打该用户的语音信箱留言。

5. 其他业务

如来电显示、呼叫转移、呼叫等待,呼叫限制等。因业务种类很多,这里就不一一述说了。

1.4.2 3G 移动通信的主要业务

当前我国的 3G 系统已经投入商用,3G 系统的用户数量快速增加,下面对 3G 的业务市场特点进行简单介绍。

1. 语音通信业务仍占主流,数据业务份额不断上升

尽管 3G 移动通信系统的最大特点是更高的数据通信业务能力,但目前对 3G 运营商来说,语音通信业务仍是他们的主要收入来源,但数据业务收入比重不断上升的趋势还是非常明显的。

2. 新业务层出不穷

随着 3G 网络运营经验的增加,在业务创新方面的能力逐渐发挥出来。例如,移动 3D 音

乐下载业务，该项业务已经在日韩、欧美等市场获得用户认可，业务量迅速增加，给运营商带来了直接的经济效益；移动 P2P 应用业务，通过 P2P 业务共享软件、图片、文件、视频等；流媒体业务，是指把连续的影像和声音信息经过压缩处理后放到网络服务器上，使移动终端可以边下载边播放；交互性，点播、直播、触发式监控；实时性，可边下载边播放；暂时性，客户端可接收、处理和回放流内容，处理和播放完随即被清除。3G 系统的视频/流媒体业务如表 1-5 所示。

表 1-5 3G 系统的视频/流媒体业务

类 别	业 务 描 述
视频通话	个人、企业沟通点对点视频、会议电话视频
	被叫关机、无人接听、忙转视频邮箱
	被叫关机、无人接听、忙的时候，主叫可通过菜单选择自录视频，可选择定时呼叫对方
	即时会议：点对点视频通话中，其中一方按特殊键+被叫号码，发起呼叫第三方加入
	通话过程中，其中一方将图表、文本的图像推送给对方
个性视频	角色替代：视频通话中，如果用户不想让对方看到自己，或者为了好玩，可以用卡通人物替代显示，并且可以有表情动作
	个性留言：到运营商门户选择播放运营商提供的 Flash、电影片段、图片和音乐，同时将生日留言、节日祝贺、情侣悄悄话等配音加上，并且可以选择多个片段接在一起；可以拨打特服号码视频录像，并到运营商网站选择背景图片、短片，例如生日、节日的烟花背景，网络设备将两个视频混合；定时呼叫对方播放，或者通过邮件发送
	多媒体彩铃业务：用户可以设定自己的特色视频彩铃，作为被叫时播放给主叫听
视频点播/直播	电影、电视、MTV、体育短篇点播，电视直播，远程教育
远程医疗	医院大客户合作方案：开展无线远程医疗业务，设立远程医疗档案，可以在线诊断，离线录像诊断，运营商小额支付代收诊费
视频广告	商家可以根据用户的订购，推送免费的视频广告，如楼盘、汽车、衣食等
视频报警	个人安全综合业务：用户按紧急求助键后，网络智能服务器可以自动启动录像，并且主动呼叫（同时短消息通知）设定的求助号码，呼通后连通
视频监控	家庭、企业无线视频监控设备（视频手机的变种，分配移动号码，可以租赁给用户），用户可直接拨打接通后查看，可以定时录像，然后到相关网站查看
	交通路口监控：用户可以到运营商的网站查看某路口的交通状况
智能家居	家庭视频门铃，宠物喂养的视频，都可以和手机互通
条码识别	条码识别：用户到商场，想了解食品是否安全、衣服厂家情况，可以直接用手机照相机头拍摄条码，网络则直接提供产品相关信息

3G 业务的花样翻新表现了运营商正在努力创造更多、更丰富的业务，以期望将更多的用户吸引到 3G 网络，而随着新的运营商不断采用 3G 网络，更多更好的 3G 新业务还会被开发出来。从全球 3G 发展的态势来看，运营商的数量和用户的数量明显增加，但由于 3G 用户的需求差异性非常大，因此并不存在“杀手级业务”，要想在 3G 市场的激烈竞争中取得成功，必须

要积极掌握新技术,寻找创新的商业模式,建立牢固的产业链。

1.5

习题

1. 填空题

- (1) 移动通信是_____,它是利用_____的辐射与传播,经过空间来_____的通信方式。
- (2) 一个信号的频谱是指它所包含的_____范围。
- (3) 对于许多信号而言,其绝对带宽是无限的,但是一个信号的绝大部分能量都集中在相当_____的频带内,这个频带称为_____。
- (4) 单工通信是指通信双方电台_____地进行收信和发信;双工通信是指通信双方可以_____进行信息的发射与接收。
- (5) 在无线通信系统中,噪声对信号的干扰程度用_____表示,即信噪比,用 S/N 或 SNR 来表示,单位为分贝 (dB)。
- (6) 移动通信的业务是指_____而提供的服务。

2. 是非判断题 (正确画√, 错误画×)

- (1) 移动通信技术是指所有的通信设备组成部分,在通信过程中都是处于移动状态的。 ()
- (2) 3G、4G 移动通信系统仅仅是指系统的载波频率为 3GHz、4GHz。 ()
- (3) 不论是 2G、3G 还是 4G 移动通信系统,其基本业务都包括语音通话业务、短消息业务、语音信箱服务和传真、数据通信业务、人工查询业务、来电显示和呼叫限制等。 ()

3. 选择题 (将正确答案的序号填入括号内)

- (1) 在移动通信系统中,信道内传输的是 ()。
A. 电磁波信号 B. 光信号 C. 声音信号 D. 图像信号
- (2) 移动通信系统的工作频段为 ()。
A. 音频频段 B. 视频频段 C. 高频微波频段 D. 光频频段
- (3) WCDMA、CDMA2000、TD-SCDMA 是 () 的 3 大主流标准。
A. 2G 系统 B. 3G 系统 C. 光纤系统 D. 电视广播系统

4. 简答题

- (1) 什么是移动通信?
- (2) 频率再用技术与频率共用技术有何区别?试比较集群移动通信系统与蜂窝移动通信系统的异同。
- (3) 与其他通信方式相比,移动卫星通信系统的特点有哪些?
- (4) 典型的移动卫星通信系统有哪些?
- (5) 移动通信的工作方式分为哪几种?蜂窝移动通信系统采用哪种工作方式?
- (6) 简述移动卫星通信系统的构成及通信原理。

5. 画图题

- (1) 查阅有关参考书,画出双工通信系统的工作示意图,并简述其工作过程。

(2) 参考图 1-2 所示小区覆盖示意图, 补齐至少 3 个区群示意图。

6. 计算题

某发射机发射的信号功率为 1W, 其信号强度为多少? 当发射功率增大为原来的 4 倍时, 则信号强度增加了多少?

调研项目: 移动通信技术的发展与现状



调研目的:

1. 通过调研, 了解我国移动通信技术的总体发展过程及现状。
2. 了解目前我国移动通信技术水平及其应用状况。
3. 增强对移动通信技术的感性认识, 提高读者学习移动通信技术的积极性, 了解移动通信技术在通信领域中的地位和作用。



调研要求:

1. 在调研的基础上, 要按统一要求格式撰写 5 000 字左右的《关于我国移动通信技术的总体发展过程及现状》调查研究报告。
2. 调研资料要真实、可靠, 论证要清晰、准确。报告中, 在简述我国移动通信技术发展历程的基础上, 重点阐述当前我国移动通信的应用技术及其影响, 最后简要介绍其发展趋势。



提示:

可利用图书馆、互联网等查阅有关资料, 在有条件的情况下, 可到有关科研院所、企业、公司进行调研。

实验 1 认识移动通信系统的基本组成



实验目的:

1. 了解移动通信技术实验系统的面板结构, 学习各组成模块的作用, 找到各主要测试点的位置, 掌握测试方法以及所需要的仪器仪表的使用。
2. 了解数字移动通信的原理和移动通信系统的基本结构。
3. 初步了解一个完整移动通信系统的基本组成结构, 重点掌握设备的结构、工作原理及使用注意事项。



实验方法:

1. 课前仔细阅读实验指导书，掌握移动通信设备的面板结构，了解有关测量仪器的使用方法。
2. 根据实验指导书的说明，结合实验设备，在老师的指导下，进行实验数据的测量。
3. 注意实验过程中观察到的现象，做好记录，并进行分析。

>>> 第2章

移动信道及数字调制技术

- 🏠 2.1 无线电波的传播方式
- 🏠 2.2 移动无线信道特征
- 🏠 2.3 抗信道衰落技术
- 🏠 2.4 移动通信的数字调制技术
- 🏠 2.5 习题

对任何通信系统来说,信道都是不可缺少的组成部分。按其传输媒介的不同,信道可以分为有线信道和无线信道两种,架空明线、同轴电缆、光缆等属于有线信道。中长波地波传播、短波电离层反射与散射、微波直射传播、光波视距传播等则属于无线信道。按照信道特性参数随外界因素影响而变化的快慢又可分为恒参信道和随参信道。恒参信道对信号传输的各种影响是确定的或是变化极其缓慢的,也就是说,在足够长的时间内,信道的参数基本不变。例如有线信道、人造卫星中继、光纤传播、光波视距传播等基本是恒参信道。随参信道的参数随时间而变化,而且是多径传播,移动通信信道是典型的随参信道。另外,利用无线电波进行各种信息的传输,必须要用到调制与解调技术。

2.1 无线电波的传播方式

现代移动通信广泛使用的频段是 VHF 和 UHF。VHF 为超短波(米波),波长范围为 1~10m,频率范围为 30~300MHz。UHF 为分米波(微波),波长范围为 0.1~1m,频率范围为 300~3 000MHz。这两个频段主要应用于无线电广播、通信、电视、雷达、导航、中继通信等。了解移动无线信道之前,首先要了解无线电波的传播方式和特点。

2.1.1 电波传播方式

发射机天线发出的无线电波可以通过不同的路径到达接收机天线。典型无线电波传播路径如图 2-1 所示,在移动通信中,主要的电波传播方式有地面波、天波、直射波和地面反射波。它们与电波频率和电波的极化方式有关。

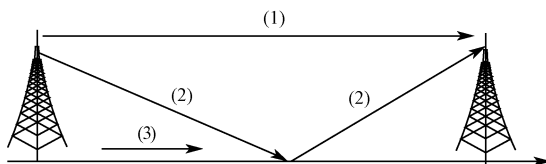


图 2-1 典型无线电波传播路径示意图

1. 地面波

电波沿着地球表面传播的方式为地面波，如图 2-1 中的 (3) 所示。地面波的传输损耗随着频率的升高而急剧增加，传播距离迅速减小。因此在 VHF 和 UHF 频段，地面波的传播可以忽略。

2. 天波

从天线发射向高空辐射的电波在电离层内被连续折射而返回地面，到达接收天线的传播方式称为天波传播。这种传播方式以短波为主，可以进行数千千米的远距离传播。由于电离层特性的随机变化，天波信号的衰落现象比较严重。

3. 直射波

从发射天线发出的电波直接到达在视距内的接收天线的传播方式称直射波。这种传播方式又称视距传播，为 VHF 和 UHF 频段的主要传播方式，如图 2-1 中的 (1) 所示。

4. 地面反射波

从发射天线发出的无线电波经过地面反射，到达接收天线的传播方式称为地面反射波传播。在视距传播中，直射波和地面反射波之间的干涉构成对信号传播的主要影响，成为地面移动通信影响信号传播的重要因素，如图 2-1 中的 (2) 所示。

2.1.2 自由空间的电波传播

所谓自由空间是指天线周围无限大真空时的电波传播，它是理想的传播条件。在理想空间中，不存在电波的反射、折射、绕射、色散和吸收等现象，电波传播速率等于真空中光速 $c(3 \times 10^8 \text{ m/s})$ 。

虽然电波在自由空间里传播不受阻挡，但当电波经过一段路径传播之后，能量会有衰减，这种损耗是由于辐射能量的扩散引起的。

自由空间的传播损耗定义为

$$\begin{aligned} [L_{fs}]_{\text{(dB)}} &= 10 \lg \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 = 20 \lg \frac{4\pi d}{\lambda} = 20 \lg \frac{4\pi d f}{c} \\ &= 32.44 + 20 \lg d + 20 \lg f \quad (\text{dB}) \end{aligned} \quad (2-1)$$

式中， d 为收、发天线之间的距离 (km)； λ 为无线电波的波长 (m)； f 为无线电波的频率 (MHz)。

可见，自由空间中电波传播损耗（也称为衰减）仅与电波工作频率 f 和传播距离 d 有关，当 f 或 d 增大 1 倍时， $[L_{fs}]$ 将分别增加 6dB。

2.1.3 大气中的电波传播

在实际的移动无线信道中，电波在低空大气中传播，由于低空大气不是均匀介质，其温度、湿度、密度、气压等都随着空间和时间发生变化，产生折射和吸收等现象，这在 VHF 和 UHF 频段尤为突出，直接影响视距传播的极限距离。

1. 大气折射的基本概念

当电磁波从一种介质射入另一种介质时，传播方向会发生变化，这就是折射现象，如

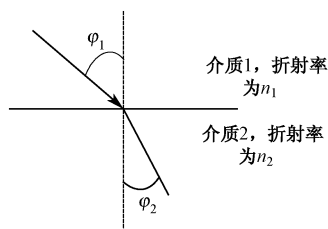


图 2-2 电波折射示意图

图 2-2 所示。图中 φ_1 为入射波与反射面法线间的夹角，称为入射角； φ_2 为折射波与法线间的夹角，称为折射角。根据折射定律，入射角的正弦与折射角的正弦之比，等于两种介质材料折射率的反比，即有

$$\frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2-2)$$

可以看出，电磁波从折射率小的介质射入折射率大的介质，则折射波靠近法线。又由折射定律，电波传播速度 v 与

大气折射率 n 成反比，即

$$v = \frac{c}{n} \quad (2-3)$$

式中， c 为光速； n 为大气折射率； v 为无线电波在大气中的传播速度。因介质材料的折射率 n 总是大于 1，所以电波在任何介质中的传播速度 v 都是小于光速 c 的。

当一束电磁波通过折射率随地面高度变化的大气层时，因不同的高度上电磁波的传播速度不同，从而使射束发生弯曲，弯曲的方向和程度取决于大气折射率的垂直变化。由于大气折射率引起的电波传播方向发生弯曲的现象，称为大气对电波的折射。在视距传播距离内，由于折射现象所产生的折射波会同直射波同时存在，从而也会产生多径衰落。

2. 视距传播的极限距离

由于地球是球形的，凸起的地表面会挡住视线，视线所能到达的最远距离称为视距传播的极限距离，如图 2-3 所示。图中所示天线的高度分别为 h_1 和 h_2 ，两个天线的顶点连线 AB 与地面相切于 C 点。由于大气折射对电磁波的影响，在工程中常用“地球等效半径”来表征地球半径。由于地球等效半径 R 远大于天线的高度，可求得 $d_1 \approx \sqrt{2Rh_1}$ ， $d_2 \approx \sqrt{2Rh_2}$ ，则视距传播极限距离 $d = d_1 + d_2 = \sqrt{2R}(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})$ 。

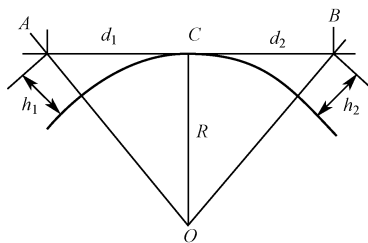


图 2-3 视距传播的极限距离

在标准大气折射情况下，地球等效半径 $R=8\,500\text{km}$ ，可得无线电波的视距传播极限距离为

$$d = 4.12(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad (2-4)$$

式中， h_1 和 h_2 的单位是 m ， d 的单位是 km 。

【例 2-1】 在标准大气折射下，发射天线高度为 200m ，接收天线的高度为 2m ，则视距传播极限距离为多少？

解：由式 (2-4) 可得视距传播极限距离为

$$d = 4.12(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) = 4.12 \times (\sqrt{200} + \sqrt{2}) = 64.092(\text{km})$$

3. 障碍物的影响与绕射损耗

在移动通信的覆盖范围内,地形环境十分复杂,因此很难对各种地形引起的电波损耗做出准确的定量计算,常采用工程估算的方法做一些定性的分析。实际情况下,除了考虑在自由空间中的视距传播损耗外,还应考虑各种障碍物对电波传输引起的损耗,由障碍物引起的附加传播损耗称为绕射损耗。

设障碍物 P 与发射端 A 和接收端 B 的相对位置如图 2-4 和图 2-5 所示。图中 x 表示障碍物顶点 P 至收发天线顶点 AB 连线之间的距离。在传播理论中, x 称为菲涅尔余隙。规定有阻挡时余隙为负(如图 2-4 所示),无阻挡时余隙为正(如图 2-5 所示)。

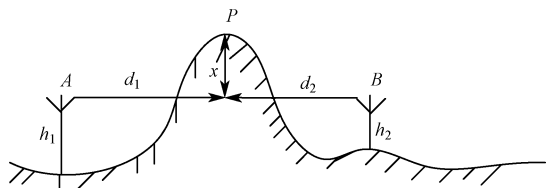


图 2-4 负余隙

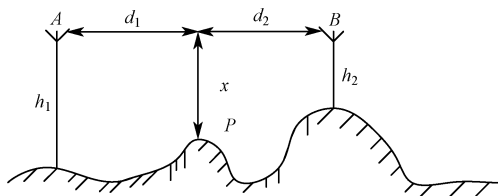


图 2-5 正余隙

根据菲涅尔绕射理论,可得到障碍物引起的绕射损耗与菲涅尔余隙之间的关系,且有第一菲涅尔半径为

$$x_1 = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (2-5)$$

当 $x > 0.5x_1$ (正余隙) 时,障碍物对直射波传播基本没影响。为此,在选择天线的高度时,根据地形尽可能使服务区内各处的菲涅尔余隙 $x > 0.5x_1$ 。当 $x < 0$ (负余隙),即两天线顶点 AB 直射波低于障碍物顶点时,损耗急剧增加。当 $x=0$,即 AB 直射波从障碍物顶点擦过时,附加绕射损耗约为 6dB。

4. 反射波

当电波在传播过程中遇到两种不同介质的光滑界面时,如果界面尺寸比电波波长大多,就会发生镜面反射现象。由于地面与大气是两种不同的介质,所以入射波在地面上会产生反射,如图 2-6 所示。

当电波遇到比波长大得多的物体时也发生反射,所以反射发生于地球表面、建筑物和墙壁表面等。通常,在考虑地面对电波的反射时,按平面波进行处理,即电波在反射点的反射角等于入射角。在图 2-6 中,由发射端 A 发出的电波分别经过直射波 AB 和地面反射路径 ACB 到达接收端 B ,由于两者路径不同从而会产生附加相移。图中入射波和直射波的路径差为

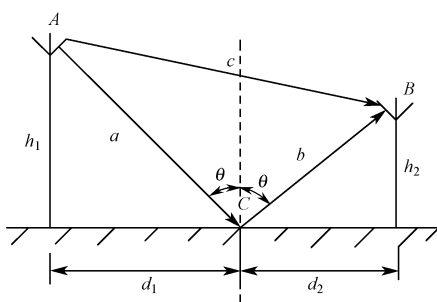


图 2-6 反射波与直射波

$$\Delta d = \frac{2h_1 h_2}{d_1 + d_2} \quad (2-6)$$

由路径差 Δd 引起的附加相移为

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta d \quad (2-7)$$

式中, $\frac{2\pi}{\lambda}$ 为传播相移常数。但由于地面反射时大都要发生一次反相, 实际的两路电波相位差 $\Delta\varphi$ 为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta d + \pi \quad (2-8)$$

直射波与地面反射波的合成波将随路径差 Δd 的变化而变化, 有时会同相相加而增强, 有时会反相叠加而减弱甚至抵消, 这就造成了合成波的衰落现象。因此在选择站址时, 应力求减弱地面反射, 或调整天线的位置或高度, 使地面反射区离开光滑界面, 当然这种要求在移动通信的基站建设中是很难实现的。

5. 散射波

当无线电波遇到粗糙表面时, 反射能量由于散射而散布于所有方向, 这种现象称为散射。散射波产生于粗糙表面、小物体 (小于波长的物体) 或其他不规则物体。在实际的通信系统中, 树叶、灯柱、街道的标志等都会发生散射。

2.2

移动无线信道特征

在移动通信中, 信号是通过无线电波传播的, 而无线信道是无线电波的传播通路, 它是移动通信系统必不可少的组成部分。

2.2.1 无线信道的概念

如前所述, 信道按照传输媒质, 可划分为有线信道和无线信道两种类型。有线信道指通信双方的信号通过一条固定的线路进行传输。无线信道是一种电磁波的导引传播媒质, 包括中长波地波传播、短波电离层反射、超短波和微波视距传播、人造卫星中继及一些散射信道等, 对于无线电波而言, 从发射端到接收端, 两者之间没有一条有形的连接, 也不是固定一条, 可能有多条, 所以信道是通信双方之间通路的一种形象比喻。为了比较形象地描述发射端与接收端之间的工作, 可以想象一条通路连接两端, 这条通路就是无线信道。无线信道也有宽度, 即频率带宽, 就像公路有一定的宽度一样。

移动信道是典型的随参信道。在移动通信系统中, 电波到达接收端天线的信号不是单一路径传播的, 而是许多路径的众多波的合成。这些波由于经过的路径不同, 造成多径衰落; 由于移动台的移动, 还会造成多普勒效应; 由于气候条件和地区位置的变化也会引起信号的变化, 造成慢衰落。所以由于移动、气候、位置、环境等的复杂性, 造成了移动通信的复杂性。

2.2.2 移动通信信道的多径传播特性

移动通信接收端天线所接收到的信号幅度是随机起伏变化的, 这种变化就是衰落, 这是移动通信电波传播的一个基本特点。对于这种随机量的研究通常采用统计分析法。即在研究衰落特性时, 先测得各个不同时刻的实际信号电平, 掌握衰落的瞬时分布情况, 然后进行统计分析, 得到描述衰落特性的一些数字特征。

1. 与移动信道有关的几个概念

(1) 地形与地物。不同的传播环境和地形地物对电波传播有较大影响。地形地物的种类千

差万别,对移动通信的影响也是错综复杂的。总的来说,各种各样的地形可分为两类:中等起伏地形和不规则地形。中等起伏地形是指在电波传播路径上,地形断面的起伏高度在 20m 以下,且起伏缓慢、较为平坦的地形。其他的地形,如丘陵、孤立山岳、斜坡和水陆混合地形都属于不规则地形。按照地物的稠密程度可将地物分为 3 类:

①开阔地。在电波传播方向上没有高大树木、建筑物等障碍物的开阔地带,如农田、荒野、广场、沙漠、戈壁滩等。

②郊区。在移动台附近有障碍物但不稠密的地区,如有少量低层房屋、小树林、市郊公路等地区。

③市区。有稠密的建筑物、高层楼房、茂密的高大树木的地区。以上 3 种地区都有过渡带。

(2) 场强中值。当场强值高于规定的电平值的持续时间占统计时间的一半时,所规定的那个电平值就是场强中值。可见,当场强中值恰好等于接收机的最低门限值时,通信的可通率为 50%,即仅在 50%的时间内能维持正常通信。因此,必须使实际的场强中值远远大于接收机的最低门限值,才能保证在大多数时间内正常通信。

(3) 衰落深度。衰落深度描述了衰落的严重程度。在移动通信中,深度可达 30dB,即功率衰落可达 1 000 倍。

(4) 衰落速率。衰落速率又称衰落率,它描述了衰落的频繁程度,即场强的变化快慢。研究表明,衰落速率与电磁波工作频率、移动台的移动速度、行进的方向等因素有关。工作频率越高,移动台运动速度越快,则场强变化越频繁。

(5) 衰落持续时间。衰落持续时间是指场强低于接收机门限电平的持续时间,用于表示信息传输受影响的程度和信令误判的程度。通话过程中如果接收到的信号电平低于接收机的门限电平,就有可能造成通话中断或发生信令误判。

2. 移动信道的时变特性

移动信道是一种时变信道,无线电信号通过移动信道时会受到来自不同途径的衰减损害,信道对传输信号的作用可以分为 3 类:

(1) 自由空间的传播损耗与弥散。如前所述,自由空间是一种理想空间,它是指天线周围无限大真空时的电波传播空间,电波在自由空间里传播不受阻挡,但当电波经过一段路径传播之后,能量会有衰减。这种损耗是由于辐射能量的扩散引起的,即发生能量弥散。

(2) 阴影衰落。当电波在传播途径上遇到起伏地形、建筑物、高大的树木等遮挡时,会产生电磁场的阴影,移动台在运动中通过不同障碍物的阴影时会引起接收天线处场强中值的变化,从而引起衰落,这就是阴影衰落。由于这种衰落的变化速率较慢,又称慢衰落。慢衰落速率主要取决于传播环境,即移动台周围地形、建筑物的分布与走向、街道的走向、基站天线的位置与高度、移动台运动速度等,而与电磁波的工作频率无关。其衰落的深度取决于信号的频率与障碍物状况,例如,频率较高的信号更容易穿透建筑物,而频率较低的信号有更强的绕射能力。

(3) 多径衰落。这是由于移动传播环境的多径传播引起的衰落。多径衰落是移动信道特性中最具特色的部分。

以上 3 种效应表现在不同的距离范围内:①如果在数十个波长范围内,则接收信号场强的瞬时值呈现快速变化的特征,这是由多径衰落引起的,又称快衰落(小尺度衰落)。在这个范围内对信号求平均,可得短区间中心值。②在数百个波长范围内,信号的短区间中心值也出现缓慢变动的特征,这就是阴影衰落。在较大区间内对短区间中心值求平均,可得到长区间中心

值。③长区间中心值随距离基站位置的变化而变化,表明了以公里计的较大范围内接收信号的变化特性(大尺度衰落)。

从无线系统工程的角度看,阴影衰落和传播损耗主要影响无线区域的覆盖,合理的设计可以消除这种不利的影响。而多径衰落则严重影响信号的传播质量,而且不可避免,只能采用抗衰落技术来减小其影响。

3. 多普勒频移

当移动台在运动中通信时,接收信号的频率会发生变化的现象称为多普勒效应。由于移动而引起的接收信号的附加频移称为多普勒频移(Doppler Shift),如图2-7所示。当移动台以恒定速率 v 在长度为 d ,端点为 X 和 Y 的路径上运动时,收到来自发射源 S 发出的信号,无线电波从源点 S 出发,在 X 点和 Y 点分别被移动台接收时所走的路径差为

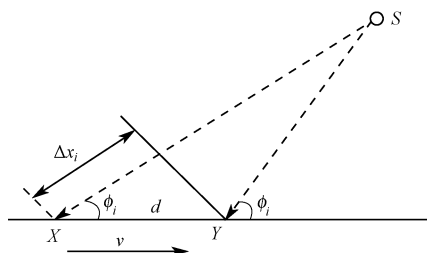


图 2-7 多普勒频移示意图

$$\Delta x_i = d \cdot \cos \phi_i = v \cdot \Delta t \cdot \cos \phi_i \quad (2-9)$$

式中, Δt 为移动台从 X 运动到 Y 所需要的时间; ϕ_i 为入射电波与移动台运动方向的夹角,因源点 S 距离 X 和 Y 很远,可认为 X 、 Y 处 ϕ_i 是相同的。所以由路径差造成信号相位变化值为

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi \cdot \Delta x_i}{\lambda} = \frac{2\pi \cdot v \cdot \Delta t}{\lambda} \cos \phi_i \quad (2-10)$$

式中, λ 为波长。多普勒频移为

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} = \frac{v}{\lambda} \cos \phi_i = f_m \cdot \cos \phi_i \quad (\text{Hz}) \quad (2-11)$$

式中, $f_m = \frac{v}{\lambda}$ 是 f_d 的最大值,称为最大多普勒频移,它与入射角无关; v 为移动台的运动速度; λ 为波长。

可见,多普勒频移与移动台运动速度、移动台运动方向、无线电波入射方向和移动台运动方向之间的夹角有关。若移动台朝向入射波方向运动,则多普勒频移为正(接收信号频率上升);若移动台背向入射波方向运动,则多普勒频移为负(接收信号频率下降)。信号经过不同方向的传播,其多径分量造成接收机信号的多普勒扩散,因而增加了信号的带宽。

【例 2-2】 若载波频率 $f_0=900\text{MHz}$,移动台运动速度 $v=50\text{km/h}$,则最大多普勒频移为多少?

$$\text{解: } f_m = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{c} f_0 = \frac{50 \times 10^3}{3.6 \times 10^3} \times \frac{1}{3 \times 10^8} \times 9 \times 10^8 = 41.67(\text{Hz})$$

4. 多径衰落

陆地移动信道的主要特征是多径传播。多径传播是由于在电波传播路径上会遇到由各种建筑物、树木、植被及各种起伏的地形引起电波的反射、绕射、散射等现象,如图2-8所示。当

无线电波传输到移动台的接收天线时,信号不是单一路径来的,而是许多路径来的多个信号的叠加,造成接收信号有时同相叠加而增强,有时反向叠加而减弱的幅度急剧变化,产生所谓的多径衰落。多径衰落将严重影响信号的传输质量。为了对多径信号做出数学描述,给出如下假设:①在发射机和接收机之间没有直射波通路;②有大量反射波存在,且到达接收天线的方向角是随机的,相位也是随机的,且在 $0\sim 2\pi$ 内均匀分布;③各个反射波的幅度和相位都是统计独立的。

一般来说,在离基站较远,反射物较多的地区,是符合上述假设的。或者当信道中不存在一个较强的直达路径时,多径衰落的接收信号包络服从瑞利分布,故把这种衰落称为瑞利衰落。此时,接收信号的相位服从 $0\sim 2\pi$ 内的均匀分布。

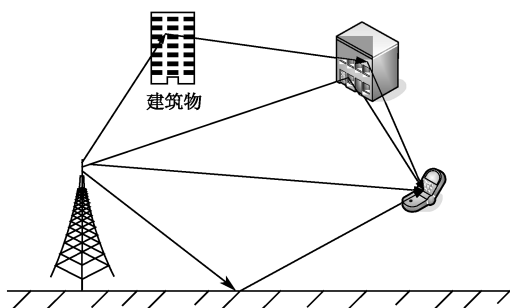


图 2-8 移动信道传播路径

但是当接收信号中有视距传播的直达波信号时,视距信号成为主接收信号分量,同时还有不同角度随机到达的多径分量叠加在这个主信号分量上,这时接收信号就呈现为莱斯分布,甚至高斯分布。但是当主信号减弱到与其他多径信号分量的功率一样,即没有较强的视距信号时,混合信号的包络又服从瑞利分布。所以,在接收信号中没有主导分量时,莱斯分布就转变为瑞利分布。

莱斯分布适用于一条路径明显强于其他路径的情况,但并不意味着这条路径就是直射路径。在非直射系统中,如果源自某一个散射体路径的信号功率特别强,信号的衰落也会服从莱斯分布。可见,瑞利分布是莱斯分布的一个特例,莱斯分布是瑞利分布的扩展。

2.2.3 移动通信的信道特征

移动无线信道是多径衰落信道,它可以从时域和频域两个角度进行描述。

1. 时间色散和频率选择性

时间色散和频率选择性都是由于不同时延的多径信号叠加的结果。这两种效应是同时出现的,只是表现的形式不同。时间色散体现在时域,就是把发送端的一个信号沿时间轴展开,使接收信号的持续时间比发送信号的持续时间长。频率选择性体现在频域,是指无线信道对发送信号起到滤波作用,使信号中的不同频率的分量衰落幅度不同。

如果发送信号的带宽足够窄,则发送信号的所有频率分量几乎经历相同的衰落,信号在传输过程中将不会发生失真,这时的衰落是非频率选择性衰落。当发送信号的带宽增加时,信号频谱中的边缘频率分量将会逐渐产生失真。这样信道就会对信号产生滤波的作用,也就是对不同频率的分量衰减系数不同,形成频率选择性衰落。当信号的带宽继续增大时,频率选择性衰落将会变得更加严重。

用于描述信道时间色散特性的两个参数是时延扩展和相关带宽。

1) 时延扩展

在多径传播条件下,接收信号会产生时延扩展。当发送端发送一个极窄的脉冲信号时,由于存在多条不同的传播路径,且路径长度不一样,则发送信号沿各个不同路径到达接收天线的的时间就不一样,即使各个脉冲可能是离散的,也有可能连成一片,如图 2-9 所示。

但在实际上,情况要比图 2-9 复杂得多。因为各个脉冲幅度随机变化,它们在时间上可能

是离散的,也可能连续变化,甚至很多脉冲信号会变成有较大宽度的连续脉冲信号,由于多径衰落的影响,它们的幅度也有较大的起伏。根据测试,移动通信中接收机接收到的多径时延信号的强度如图 2-10 所示。图中 $E(t)$ 是归一化的时延强度曲线,也称为多径散布谱,是由不同时延信号强度所构成的时延谱。 $E(t)$ 的均方根常称为时延扩展,记做 Δ ,表示多径时延散布的程度。 $t=0$ 处表示 $E(t)$ 前沿, τ_{\max} 是最大时延,即强度下降 30dB 时测定的时延值。一般来说,市区的时延要比郊区大,也就是说,从多径时延考虑,市区传播条件更为恶劣。

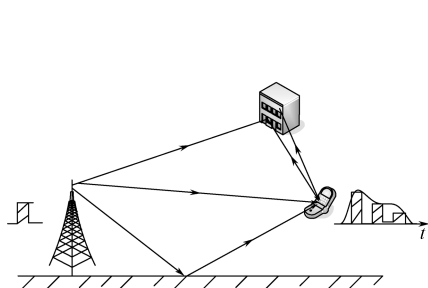


图 2-9 时延扩展示意图

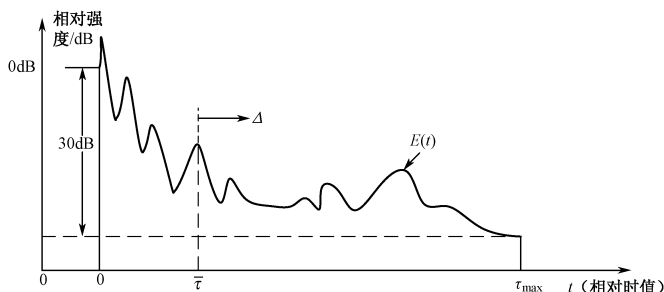


图 2-10 多径时延信号强度

2) 相关带宽

根据衰落与频率的关系,将衰落分为两种:频率选择性衰落和非频率选择性衰落,后者又称平坦衰落。频率选择性衰落是指传输信道对信号的不同频率分量有不同的随机响应,信号中不同频率分量衰落不一致,从而引起信号波形的失真。从频域观点看,多径时散现象导致频率选择性衰落。非频率选择性衰落是指信号经过传输信道后,各频率分量的衰落是相关的,具有一致性,衰落波形不失真,也就是说,各频率分量的衰落状况与频率无关。

是否发生频率选择性衰落或非频率选择性衰落,要由信道和信号两方面来决定。对移动信道来说,存在一个固有的相关带宽,当信号的带宽小于相关带宽时,发生非频率选择性衰落;当信号的带宽大于相关带宽时,发生频率选择性衰落。

对数字移动通信来说,当码元速率较低,信号的带宽小于信道相关带宽时,信号通过信道传输后各频率分量的变化具有一致性,衰落为平坦衰落,信号波形不失真。当码元速率较高,信号带宽大于信道相关带宽时,信号通过信道传输后,各频率分量的变化不一致,衰落为频率选择性衰落,引起波形失真,造成码间干扰。相关带宽为 $B_c = \frac{1}{2\pi \cdot \Delta}$, 式中, Δ 为时延扩展。

实际应用中,常用最大时延 τ_{\max} 的倒数来规定相关带宽,即 $B_c = \frac{1}{\tau_{\max}}$ 。

【例 2-3】 时延扩展为 $\Delta=0.25\mu\text{s}$, 则相关带宽为多少?

解: $B_c = \frac{1}{2\pi \cdot \Delta} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 0.25 \times 10^{-6}} = 636.9(\text{kHz})$

【例 2-4】 某市区实测最大时延 $\tau_{\max}=3.5\mu\text{s}$, 则相关带宽为多少?

解: $B_c = \frac{1}{\tau_{\max}} = \frac{1}{3.5 \times 10^{-6}} = 285.7(\text{kHz})$

此时,对于带宽为 25kHz 的窄带数字信号,由多径效应引起的衰落为平坦衰落。相关带宽实际上是对移动信道传输具有一定带宽信号的能力的统计度量。对于某个移动环境,其时延扩展 Δ 可由大量实测数据经过统计处理计算出来,并可进一步确定这个移动信道的相关带宽 B_c 。可见,相关带宽是移动信道的一个基本特性。信号通过信道时出现何种衰落,取决于信号的带宽。

2. 频率色散和时间选择性

多普勒扩展和相关时间是用来描述信道频率色散和时变特性的两个参数,这种时变特性是由移动台与基站之间的相对运动引起的,或是由信道路径中物体的运动引起的。当信道是时变信道时,这种信道具有时间选择性衰落。时间选择性衰落会造成信号的失真,这是由于发送信号还在传输的过程中,传输信道的特性已经发生了变化。由于移动台的运动,出现多普勒频移现象,也就是频率色散,使得信道成为时变信道。

1) 多普勒扩展

由于移动台的运动产生了多普勒频移,从而产生多普勒扩展。多普勒扩展 B_D 是移动无线信道的时间变化率的一种度量。当发送频率为 f_c 的正弦信号时,接收的信号谱,即多普勒频率在 $f_c - f_m \sim f_c + f_m$ 之间变化,其中 f_m 是最大多普勒频移,如图 2-11 所示。多普勒扩展 B_D 是多普勒功率谱密度 $S(f)$ 的二阶中心矩的平方根(标准差)。多普勒扩展 B_D 依赖于最大多普勒频移 f_m 和多普勒功率谱 $S(f)$ 。如果基带信号带宽 B_s 远大于多普勒扩展 B_D ,则在接收端可忽略多普勒扩展的影响。

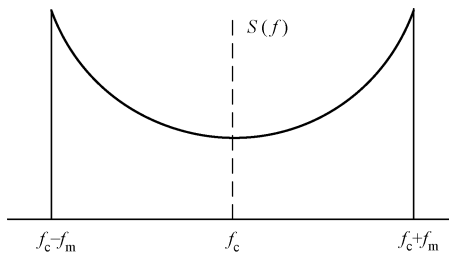


图 2-11 多普勒扩展功率谱

2) 相关时间

相关时间是信道冲激响应维持不变的时间间隔的统计平均值,是指在一段时间间隔内信道特性没有明显变化。因此,相关时间表征了时变信道对信号的衰落节拍。这种衰落是由多普勒效应引起的,并且发生在传输波形的特定时间段上,即信道在时域具有选择性。

时间选择性衰落是由多普勒效应引起的在时域产生的选择性衰落,它对数字信号误码有明显影响。为了减小这种影响,要求基带信号的码元速率远大于信道相关时间的倒数。相关时间定义为 $T_c = \frac{9}{16\pi f_m}$, 其中 f_m 是最大多普勒频移。

【例 2-5】 移动台的移动速度为 30m/s, 信道的载频为 2GHz, 则相关时间为多少?

$$\text{解: } T_c = \frac{9}{16\pi f_m} = \frac{9}{16\pi} \cdot \frac{c}{v \cdot f} = \frac{9}{16 \times 3.14} \times \frac{3 \times 10^8}{30 \times 2 \times 10^9} \approx 1(\text{ms})$$

要保持信号经过信道不会在时间轴上发生失真,就必须保证传输的码元速率大于 1kbps。

3. 角度色散和空间选择性

由于无线通信中移动台和基站周围散射环境的不同,使得多天线系统中不同位置的天线经历的衰落不同,从而产生角度色散,即空间选择性衰落。描述空间选择性衰落的两个参数是角度扩展和相关距离。

1) 角度扩展

在移动环境中,存在 3 种主要的散射体:①移动台周围的本地散射体;②基站周围的本地散射体;③远端散射体,如远离基站和移动台的山脉、建筑物等。角度扩展 Δ 就是由移动台或基站周围的本地散射体及远端散射体引起的,它是用来描述空间选择性衰落的重要参数。角度扩展与角度功率谱有关,等于角度功率谱的二阶中心矩的平方根。

角度扩展描述了角度功率谱在空间上的色散程度。根据移动环境的不同,角度扩展在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 之间分布。角度扩展越大,表明散射环境越强,信号在空间的色散程度越高;相反,角

度扩展越小,表明散射环境越弱,信号在空间的色散程度越低。这就为智能天线波束形成算法的研究奠定了基础。

2) 相关距离

相关距离 D_c 指的是信道冲激响应保证一定相关度的空间距离。在相关距离内,信号经历的衰落具有很大的相关性。在相关距离内,可以认为空间传输函数是平坦的,即如果天线放置的空间距离比相关距离小得多,信道就是非空间选择性衰落。

以上提到了 3 种选择性衰落,即频率选择性衰落、时间选择性衰落、空间选择性衰落。这 3 种衰落都属于快衰落,反映了微观小范围(数十个波长范围内)的接收电平平均值的起伏变化趋势。在实际的通信系统中,3 种选择性衰落都存在。由于移动用户的快速移动,移动用户附近的物体产生反射形成干扰,这样在信号的频域上产生了多普勒频移扩散,从而引起信号在时域上的时间选择性衰落。由于用户远处的高大建筑物或山丘的反射形成干扰,传送信号在空间和时间上产生扩散,空域上波束角度的扩散将引起接收点信号产生空间选择性衰落,时域上的扩散将引起接收点信号产生频率选择性衰落。由于接收信号受基站附近建筑物和其他物体的反射引起干扰,严重影响到达天线的信号入射角分布,从而引起信号在空间的选择性衰落。

2.3

抗信道衰落技术

信道衰落是影响通信质量的主要因素。快衰落的深度可达 30~40dB,利用加大发送功率(1 000~10 000 倍)来克服这种深衰落是不现实的,而且会造成对其他电台的干扰。分集接收是抗衰落的一种有效措施,CDMA 系统采用路径分集技术(RAKE 接收),TDMA 系统都采用自适应均衡技术,各种移动通信系统使用不同的纠错编码技术、自动功率控制技术等,都能起到抗衰落作用,提高通信的可靠性。

2.3.1 分集接收技术

所谓分集接收,是指接收端对它收到的多个衰落特性互相独立(携带同一信息)的信号进行特定的处理,以降低信号电平起伏的办法。

1. 分集接收的原理

1) 分集接收的概念

如果一条无线传播路径中的信号经历了深度衰落,那么另一条相对独立的路径中可能包含着较强的信号。因此,可以在多径信号中选择两个或两个以上的信号,这样做的好处是它在接收机中的瞬时信噪比和平均信噪比都有所提高,通常可以提高 20~30dB。图 2-12 给出了一种“选择式”合并法分集的示意图。图中 A 和 B 代表两个同一起来源的独立衰落信号。如果在任意时刻接收机选用其中幅度大的一个信号,则可得到合成信号,如图中 C 所示。由于在任一瞬间,两个非相关的衰落信号同时处于深度衰落的概率是极小的,因此合成信号 C 的衰落程度会明显减小。这里所说的“非相关”条件是必不可少的,如果两个衰落信号同步起伏,那么这种分集方法就不会有任何效果了。

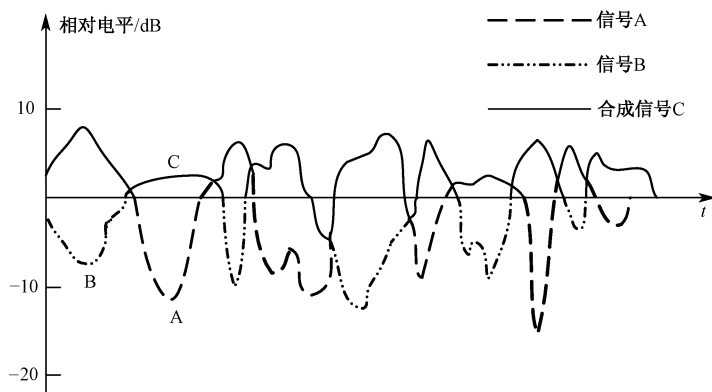


图 2-12 “选择式”合并法分集示意图

可以进一步理解分集的概念，它包括两层含义：一是分散传输，使接收端能获得多个统计独立的、携带同一信息的衰落信号；二是集中处理，即接收机把收到的多个统计独立的衰落信号进行合并（包括选择与组合）以降低衰落的影响。

2) 分集的方式

在移动通信系统中，可能用到宏分集和微分集两种分集方式。宏分集主要用于蜂窝通信系统中，也称为多基站分集。这是一种减小慢衰落影响的分集技术，其做法是把多个基站设置在不同的地理位置上（如蜂窝小区的对角上），并使其在不同的方向上，这些基站同时和小区内的一个移动台进行通信。显然，只要在各个方向上的信号传播不是同时受到阴影效应或地形的影响而出现严重的慢衰落，这种办法就能保持通信不会中断。微分集是一种减小快衰落影响的分集技术，在各种无线通信系统中经常使用。理论和实践表明，在空间、频率、极化、场分量、角度和时间等方面分离的无线信号，都呈现独立的衰落特性。据此，微分集又可分为空间天线分集、频率分集、极化分集、场分量分集、时间分集等多种分集方式。

3) 合并的方式

接收端收到 M ($M \geq 2$) 个分集信号后，如何利用这些信号减小衰落的影响，这就是合并问题。一般均使用线性合并器，把输入的 M 个独立衰落信号相加后合并输出。

假设 M 个输入信号电压为 $r_1(t)$, $r_2(t)$, \dots , $r_M(t)$ ，则合并输出的电压 $r(t)$ 为

$$r(t) = a_1 r_1(t) + a_2 r_2(t) + \dots + a_M r_M(t) = \sum_{k=1}^M a_k r_k(t) \quad (2-12)$$

式中， a_k 为第 k 个信号的加权系数。选择不同的加权系数，就可构成不同的合并方式。

2. 分集合并性能

在通信系统中，信噪比是一项非常重要的性能指标。模拟通信系统的信噪比决定了语音质量，数字通信系统中的信噪比决定了误码率。分集合并的性能是指合并前后信噪比的改善程度。

2.3.2 差错控制技术

各种移动通信系统无不采用纠错编码技术，数字信号传输既有必要也有可能采用纠错编码。例如，无线寻呼系统中采用 BCH 码及偶数校验码；模拟蜂窝系统（AMPS 及 TACS）也采用多种格式的 BCH 码及重发技术、择大判决等纠错措施；在 CDMA 移动通信系统中，采用卷积码和交织技术等。因此，纠错编码是必不可少的技术基础。

1. 纠错编码的基本原理

数字信号或信令在传输过程中,由于受到噪声的影响,信号码元波形变坏,传输到接收端后,可能发生错误判决,即把“0”误认为“1”,或者把“1”误认为“0”,这样就各出现一次误码。有时,由于受到突发的脉冲干扰,错码会成串出现。为此,在传输数字信号时,往往要根据不同情况进行各种编码。在信息码元序列中加入监督码元就称为差错控制编码,也叫做纠错编码。不同的编码方法有不同的检错或纠错能力,有的编码只检错,不能纠错。一般来说,监督位码元所占比列越大,检错纠错能力就越强。监督码元的多少通常用冗余度来衡量。例如,若码元序列中平均每两个信息码元就外加一个监督码元,则这种编码的冗余度为 $1/3$ 。换一种说法,也可以说这种编码效率为 $2/3$ 。可见,纠错编码是以降低信息传输速率为代价来提高传输可靠性的。

差错控制系统不仅用于数字通信,而且在计算机、自动控制、遥控、遥测等领域也有广泛应用。这里简单介绍编码基本原理和几种常用的编码方法。

首先用一个例子来说明纠错编码的基本原理。我们考察由 3 位二进制数字构成的码组,它共有 $2^3=8$ 种不同可能的组合。若将其全部用来表示天气,则可以表示 8 种不同的天气情况,如 000 代表晴,001 代表云,010 代表阴,011 代表雨,100 代表雪,101 代表霜,110 代表雾,111 代表雹。其中任一码组在传输中若发生一个或多个错码,则将变成另一信息码组。这时,接收端将无法发现错误。

若在上述 8 种码组中只允许使用 4 种来传送消息,譬如:000=晴,011=雨,101=霜,110=雾,则这时虽然只能传送 4 种不同的天气,但是接收端却可能发现码组中的一个错误码。例如,若 000 (晴) 中错了一位,接收码变成 100、010 或 001,这 3 种码组都是不准使用的,称为禁用码组。接收端在收到禁用码组时,就知道是错码了。当发生 3 个错码时,000 变成 111 也是禁用码组,故这种编码也能检测 3 个错码。但是,这种码不能发现两个错码,因为发生两个错码后产生的也是许用码组。

上面这种码只能检测错误,不能纠正错误,例如,当收到禁用码组 100 时,在接收端无法判断是哪一位码发生错误,因为晴、霜、雾三者错了一位都可以变成 100。

要想纠正错误,还要增加冗余度。例如,若规定许用码组只有两个:000 (晴),111 (阴),其他都是禁用码组,则能检测两个以下错码,或能纠正一个错码。例如,当收到禁用码组 100 时,若当做仅有一个错码,则可判断此错码发生在“1”位,从而纠正为 000 (晴),因为另一许用码组 111 (阴) 发生任何一位错码都不会变成这种形式。但是,若假定错码数不超过两个,则存在两种可能性:000 错一位和 111 错两位都可能变为 100,因而只能检测出存在错码而无法纠正它。

从上面的例子可以得到关于“分组码”的一般概念。如果不要求检(纠)错,为了传输 4 种不同的信息,用两位码组就够了,它们是 00、01、10 和 11。这些两位码组代表所传的不同信息,称为信息位。在上述用 3 位码表示 4 种不同的信息时,多增加的那一位为监督位,如表 2-1 所示。通常把这种信息码分组,为每组码附加若干监督码的编码称为分组码。在分组码中,监督码仅监督本码组中的监督码元。

表 2-1 分组码例子 (3, 2)

	分 组 码	信 息 位	监 督 位
晴	000	00	0
云	011	01	1
阴	101	10	1
雨	110	11	0

分组码用符号 (n, k) 表示，其中 k 是每组二进制信息码元的数目， n 表示编码组的总位数，又称码组的长度（码长）。 $n-k=r$ 为每码组中的监督码元数目，或称为监督位数目。分组码结构如图 2-13 所示。图中前面 k 位 $(a_{n-1} \cdots a_r)$ 为信息位，后面附加 r 个监督位 $(a_{r-1} \cdots a_0)$ 。表 2-1 中的分组码中， $n=3, k=2, r=1$ 。

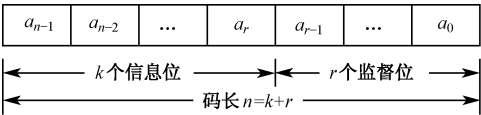


图 2-13 分组码结构

在分组码中，把“1”的数目称为码组的码重。把两个码组对应位数上的数字（0，1）不同的位数称为码距，把某种编码中各个码组间距离的最小值称为最小码距（ d_{\min} ）。

对于用 3 位的编码组，可用三维空间来说明码距的几何意义。如前所述，3 位码共有 8 种不同的可能码组。在三维空间中它们分别位于一个立方体单元的各个顶点上，如图 2-14 所示。每一码组的 3 个码元的值 (a_x, a_y, a_z) 就是该立方体的顶点坐标，而上述码距的含义在图中就对应于各个顶点之间沿立方体各边行走的几何距离。编码的最小距离是一个非常重要的参数，因为一种编码的最小码距直接关系着这种编码的检错和纠错能力。在上述例子中，我们提到当最小码距为 1 时，没有检错和纠错能力；当最小码距为 2 时，具有检查一个错误的能力；当最小码距为 3 时，除了具有两位的检错能力之外还有一位纠错能力。

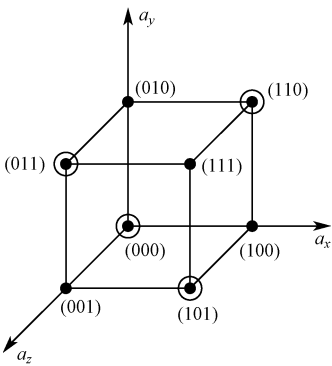


图 2-14 码距的几何意义

通常编码的检错和纠错能力与最小码距 d_{\min} 的关系有以下几种情况：当需要检测 m 个错码时，要求最小码距为 $d_{\min} \geq m+1$ ；为纠正 n 个错码，要求最小码距为 $d_{\min} \geq 2n+1$ ；为纠正 n 个错码，同时检测 m 个错码，要求最小码距为 $d_{\min} \geq m+n+1$ ($m > n$)。

对一些出现较频繁但错码很少的码组，差错控制设备按照纠错方式工作，不需要对方重发此码组，以节省时间；对一些错误码数较多的码组，在超过该码的纠正能力之后，能自动按检错方式工作，要求对方重发该码组，以降低系统的总误码率。据统计，即使仅能纠正或检出码组中的 1~2 个错误，也能使误码率降低几个数量级。实际上，差错控制编码一般就是检测或纠正 1~2 个错误。

2. 常用检错码

常用检错码分两类，一类是奇偶校验，另一类是循环冗余校验 CRC (Cyclic Redundancy Check)。检错的基本思路是发送端按照给定的规则，在 k 位信息比特后面添加 r 个校验比特，而这 r 个校验比特是按照某种规则计算出来的；在接收端对收到的信息比特按照这种规则重新计算 r 个校验比特，并将本地计算出的校验比特和接收到的校验比特对比，如果两者一致，则说明传输无误，否则认为有误。

1) 奇偶校验码

奇偶校验的种类很多，这里给出一个奇偶校验码的例子，如表 2-2 所示。

表 2-2 奇偶校验码

S_1	S_2	S_3	C_1	C_2	C_3	C_4	校验规则
1	0	0	1	1	1	0	$C_1=S_1 \oplus S_3$ $C_2=S_1 \oplus S_2 \oplus S_3$ $C_3=S_1 \oplus S_2$ $C_4=S_2 \oplus S_3$
0	1	0	0	1	1	1	
0	0	1	1	1	0	1	
1	1	0	1	0	0	1	
1	0	1	0	0	1	1	
1	1	1	0	1	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	
0	1	1	1	0	1	0	

表中信息序列长为 $k=3$ ，校验序列长为 $r=4$ ；输入信息比特为 $\{S_1, S_2, S_3\}$ ，校验比特为 $\{C_1, C_2, C_3, C_4\}$ ，表中 \oplus 符号表示模 2 加法。假设发送的比特为 $\{010\}$ ，经过奇偶校验规则得到校验序列为 $\{0111\}$ ，则发送的信息序列为 $\{0100111\}$ 。如果经过物理信道传输后，收到的序列为 $\{1100111\}$ ，根据奇偶校验规则计算出 $\{110\}$ 的本地奇偶校验码应为 $\{1001\}$ ，显然与接收到的校验序列 $\{0111\}$ 不同，表明接收到的信息有误。

在奇偶校验码的实际应用中，每个码字中的 k 个信息比特可以是输入信息比特中的 k 个连续比特，也可以是信息流中每隔一定的间隔（如一个字节）取出一个比特来构成 k 个比特。为了提高检测错误的能力，可以结合使用两种取法。

2) CRC 校验码

CRC（循环冗余校验）根据输入比特序列 $(S_{k-1}, S_{k-2}, \dots, S_1, S_0)$ ，通过 CRC 算法产生 m 位的校验比特序列 $(C_{m-1}, C_{m-2}, \dots, C_1, C_0)$ 。CRC 算法如下。

将输入比特序列表示为下列多项式的系数：

$$S(D) = S_{k-1}D^{k-1} + S_{k-2}D^{k-2} + \dots + S_1D + S_0 \quad (2-13)$$

式中， D 可以看做一个时延因子， D^i 对应了 S_i 所对应的位置。

设 CRC 校验比特的生成多项式为

$$g(D) = D^m + g_{L-1}D^{m-1} + \dots + g_1D + 1 \quad (2-14)$$

则校验比特对应下列多项式的系数：

$$C(D) = \text{Remainder} \left[\frac{S(D) \cdot D_m}{g(D)} \right] = C_{m-1}D^{m-1} + C_1D + C_0 \quad (2-15)$$

式中， $\text{Remainder}[\cdot]$ 表示取余数。式中的除法与普通多项式长除法相同，差别在于其系数是二进制数，运算是以模 2 为基础的。最终形成的发送序列为 $(S_{k-1}, S_{k-2}, \dots, S_1, S_0, C_{m-1}, \dots, C_1, C_0)$ 。

生成多项式的选择不是任意的，它必须使得生成的校验序列有很强的检错能力。常用的 16 阶 CRC 生成多项式为： $g(D)=D^{16}+D^{12}+D^5+1$ ，CRC-16 产生的校验比特为 16 比特。

3) 卷积码

卷积码是一种分组码，它的监督码元不仅与本组的信息元有关，而且还与前面若干组有关。这种编码的纠错能力强，不仅可以纠正随机错误，还可以纠正突发差错。

2.3.3 RAKE 接收技术

RAKE 接收是利用多个并行相关器检测多径信号，按照一定的准则合成一路信号，供解调用的接收技术。值得注意的是，一般分集技术把多径信号作为干扰来处理，而 RAKE 接收机则是采取变害为利的方式，也就是说利用多径现象来增强信号。简化的 RAKE 接收机组成如图 2-15 所示。

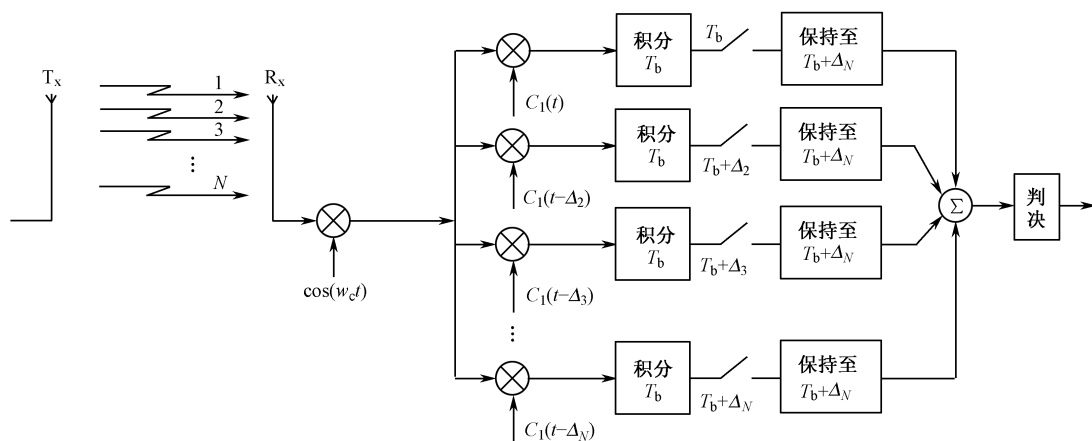


图 2-15 简化的 RAKE 接收机组成

假设发送端从天线 T_x 发出的信号，经 N 条路径到达接收天线 R_x 。路径 1 距离最短，传输时延最小，之后从第 2 条路径开始依次增加，时延最长的是第 N 条路径。通过电路测定各条路径的相对时延差，以第 1 条路径为基准时，第 2 条路径相对于第 1 条路径的相对时延差为 Δ_2 ，第 3 条路径相对于第 1 条路径的相对时延差为 Δ_3 ，之后依次类推，第 N 条路径相对于第 1 条路径的相对时延差为 Δ_N ，且 $\Delta_N > \Delta_{N-1} > \dots > \Delta_3 > \Delta_2$ ($\Delta_1=0$)。

接收端的信号通过解调后，送入 N 个并行相关器。图中用户 1 使用伪码 $C_1(t)$ ，通过定时同步和调整，产生的各个相关器的本地码分别为 $C_1(t), C_1(t-\Delta_2), C_1(t-\Delta_3), \dots, C_1(t-\Delta_N)$ ，信号经过解扩（与本地码相乘）后加入积分器。每次积分时间为 T_b ，第一支路的输出在 T_b 末尾进入电平保持电路，保持到 $T_b+\Delta_N$ ，也就是到最后一个相关器于 $T_b+\Delta_N$ 时刻产生输出。这样 N 个相关器输出于 $T_b+\Delta_N$ 时刻通过相加求和电路，再经过判决电路产生数据输出。

在图 2-15 中，由于各条路径加权系数为 1，因此为等增益合并方式。在实际系统中还可以采用最大比值合并或最佳样点合并方式。该接收机利用多个并行相关器，获得各多径信号能量，也就是 RAKE 接收机利用多径信号，提高了通信质量。

在实际系统中，每条多径信号都经受着不同的衰落，具有不同的振幅、相位和到达时间。由于相位的随机性，其最佳非相干接收机的结构由匹配滤波器和包络检波器组成。如果输入信号有多条路径，则输出的每一个峰值都对应一条多径。每个峰值幅度的不同是由每条路径的传输损耗不同引起的。为了将这些多径信号进行有效的合并，可将每一条多径通过延迟的方法使它们在同一时刻到达最大，按最大比的方式进行合并，就可以得到最佳的输出信号。然后再进行判决恢复发送数据，可采用横向滤波器来实现上述时延和最大比合并。

2.3.4 均衡技术

1. 均衡技术的原理

均衡技术是指各种用来处理码间干扰的算法和实现方法。在移动环境中,由于信道的时变、多径传播特性会引起严重的码间干扰,需要采用均衡技术来克服码间干扰。

在一个通信系统中,可将发射机、信道和接收机等效为一个冲激响应 $f(t)$ 的基带信道滤波器,如图 2-16 所示。假定发送端原始基带信号为 $x(t)$,则接收端的均衡器收到的信号为

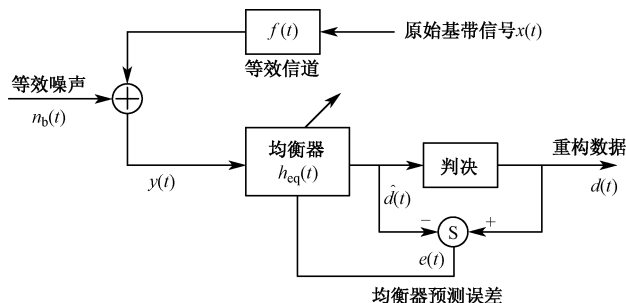


图 2-16 等效无线传输系统结构图

$$y(t) = x(t) \otimes f^*(t) + n_b(t) \quad (2-16)$$

式中, $f^*(t)$ 是 $f(t)$ 的复共轭; $n_b(t)$ 是基带噪声; \otimes 表示卷积运算。设均衡器的冲激响应为 $h_{eq}(t)$, 假定系统中没有噪声, 也就是说 $n_b(t)=0$, 则在理想情况下, 应有 $\hat{d}(t) = x(t)$, 在这种情况下没有任何码间干扰。为了使 $\hat{d}(t) = x(t)$ 成立, 则 $f(t)$ 与均衡器的复合冲激响应 $g(t)$ 必须满足

$$g(t) = f^*(t) \otimes h_{eq}(t) = \delta(t) \quad (2-17)$$

式 (2-17) 就是均衡器要达到的目标, 在频域中上式可以表示为

$$H_{eq}(f)F^*(-f) = 1 \quad (2-18)$$

式中, $H_{eq}(f)$ 和 $F^*(-f)$ 分别是 $h_{eq}(t)$ 和 $f(t)$ 的傅里叶变换。由上式可以看出, 均衡器实际上就是等效基带信道滤波器的逆滤波器。若信道为一个频率选择性信道, 则均衡器将放大被衰落的频率分量, 衰减被增强的频率分量, 从而提供一个具有平坦频率响应和线性相位响应的 $g(t)$ 。如果信道是时变信道, 则均衡器要跟踪信道的变化, 使式 (2-18) 得到基本满足。在具体数字化实现时, 设 $x(t)$ 和 $\hat{d}(t)$ 的采样值为 x_k 和 \hat{d}_k , 则均衡器的设计就是按照某种最佳的准则来使 x_k 和 \hat{d}_k 或者 x_k 和 d_k 之间达到最佳匹配。

2. 自适应均衡技术

自适应均衡器是一个时变滤波器, 它必须动态地调整其特性参数, 使其能够跟踪信道的变化, 目前广泛采用的是横向滤波器。

一般来说, 若信号持续时间小于时延扩展, 则接收信号中出现码间干扰, 这时必须用自适应均衡器来减轻或消除码间干扰。实际的移动通信系统对自适应均衡实现的基本要求是: 具有快速的收敛特性, 良好的跟踪信道时变特性的能力, 较低的实现复杂度和低的运算量。

自适应均衡器的基本结构图如图 2-17 所示, 图中符号的下标 k 表示离散时间序号, 该结构形式称为横向滤波器结构。它有 N 个延迟单元 (z^{-1})、 $N+1$ 个抽头、 $N+1$ 个可调的复数乘法器 (权值)。这些权值通过自适应算法进行调整, 调整的方法可以是每个采样点调整一次, 或

每个数据块调整一次。

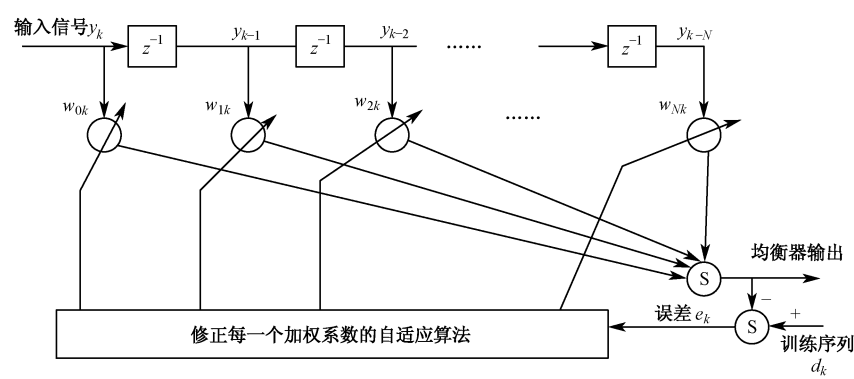


图 2-17 自适应均衡器的基本结构图

图中自适应算法是由误差信号 e_k 控制的，而 e_k 是由比较均衡器的输出 \hat{d}_k 和本地 d_k 得到的。 d_k 通常是已知的发送信号或已知发送序列（也称为训练序列），即 $d_k = x_k$ 。自适应算法利用 e_k 来最小化一个代价函数，它通过迭代的方法修正权值，从而逐步地减小代价函数。

2.4 移动通信的数字调制技术

传递信息是人类生活的重要内容之一，信息传递的手段很多，从古代的烽火、信鸽，到近代的电报、无线信号传输等，其中利用无线电进行信息传输占有极重要的地位。无线电通信、广播、电视、导航、雷达、遥控遥测等，都是利用无线电技术传输各种不同信息的具体应用，为了利用无线电技术传输语言、代码、数据、音乐、图像、视频等，调制与解调技术都是不可缺少的。

2.4.1 数字调制技术的概念

调制是在传送信号的一方（发送端）把要传输的模拟或数字信号（其频率一般较低）附加在高频电磁波上，变换成适合信道传输的高频信号后，再由天线发射出去。这里，高频振荡波是携带信号的“运载工具”，称为载波。要传输的低频模拟或数字信号称为调制信号，变换后的信号为已调信号。针对移动通信信道的特点，已调信号应具有高的频谱利用率和较强的抗干扰、抗衰落能力。

高的频谱利用率要求已调信号所占的带宽窄。它意味着已调信号频谱的主瓣要窄，同时副瓣的幅度要低（辐射到相邻频道的功率要小）。对于数字调制而言，频谱利用率常用单位频带（1Hz）内能传输的比特率（bps）来表征。

在接收信号的一方（接收端），把已调信号还原成传输的原始信号，这个过程称为解调，也叫检波。

1. 调制的原因

有人可能会问：难道不能直接把信号发射出去吗？为什么一定要经过调制的过程？这里关键问题是所要传输的信号频率或者太低（如音频信号），或者所要传输的信号频带很宽（如电

视信号 0~6MHz), 这些都对直接采用电磁波的形式传送信号十分不利, 原因如下。

(1) 天线要将低频信号有效地辐射出去, 它的尺寸就必须很大。例如, 频率为 1 000Hz 的电磁波, 其波长为 300km, 如果采用 1/4 波长的天线, 则天线的长度应为 75km, 显然, 这是难于办到的。

(2) 为了提高发射与接收效率, 在发射机与接收机内都必须采用天线和谐振回路。但语言、音乐、图像等信号的频率变化范围很大, 导致天线和谐振回路的参数应该在很宽范围内变化, 这也是难于做到的。

(3) 如果直接发射音频信号, 则发射机将工作于同一频率范围。接收机将同时收到许多不同电台的节目, 无法加以选择, 造成相互干扰。

为了克服以上的困难, 必须利用高频振荡, 把要传输的低频信号“附加”在高频振荡电磁波上。这样, 就可以减小天线的尺寸, 同时, 每个电台都工作于不同的载波频率上, 接收机可以选择不同的电台。

2. 调制的类型

按照调制器输入信号(调制信号)的形式, 调制可分为模拟调制和数字调制。模拟调制是利用输入的模拟信号直接调制载波的振幅、频率、相位, 从而得到调幅(AM)、调频(FM)和调相(PM)信号。数字调制是利用数字信号来控制载波的振幅、频率和相位。数字调制的基本类型有振幅键控(ASK)、移频键控(BFSK)和移相键控(BPSK)。此外, 常用的数字调制还有许多由基本类型改进或综合而获得的新型调制技术, 如 MSK、GMSK、GFSK、QPSK、DQPSK、OK-QPSK、 $\pi/4$ -DQPSK、QAM/MQAM 等。

现代移动通信已经进入数字通信时代, 在数字移动通信中关键技术之一就是数字调制技术。在实际应用中, 有两类用得最多的数字调制方式。

(1) 线性调制技术。主要包括 BPSK、QPSK、DQPSK、OK-QPSK、 $\pi/4$ -DQPSK 及多电平 PSK 等。这类调制技术要求通信设备从频率变换到放大和发射的过程中保持充分的“线性”, 这在制造移动设备时会增加难度和成本, 但可获得较高的频谱利用率。

(2) 恒定包络(连续相位)调制技术, 主要包括 MSK、GMSK、GFSK 等。这种调制技术的优点是已调信号具有相对窄的功率谱和对放大设备没有线性要求, 但其频谱利用率通常低于线性调制技术。

另一种获得迅速发展的数字调制技术是振幅和相位联合键控(QAM)技术。目前, 4 电平、16 电平、64 电平以至 256 电平的 QAM 都已在微波通信中获得成功应用。近几年, 随着科学技术的发展, 出现了自适应改变电平数的变速率 QAM(VR-QAM)、多载波 QAM(MC-QAM)、OFDM 等。第三代移动通信系统主要采用 MQAM、QPSK 或 8PSK 等调制方式。

对数字调制技术的基本要求, 应满足已调信号的频谱窄和带外衰减快, 易于采用相干或非相干解调, 抗干扰能力强, 适于在无线信道中传输。

2.4.2 数字频率调制

1. 移频键控(BFSK)

设输入到调制器的数字序列为 $\{a_n\}$, $a_n = \pm 1$, $n = -\infty \sim +\infty$ 。FSK 的输出信号形式(第 n 个比特区间)为

$$S(t) = \begin{cases} \cos(\omega_1 t + \varphi_1) & a_n = +1 \\ \cos(\omega_2 t + \varphi_2) & a_n = -1 \end{cases} \quad (2-19)$$

即当输入为传号“+1”时，输出频率为 f_1 的正弦波；当输入为空号“-1”时，输出频率为 f_2 的正弦波。令 $g(t)$ 为宽度 T_s 的矩形脉冲且

$$b_n = \begin{cases} 1 & a_n = +1 \\ 0 & a_n = -1 \end{cases} \quad \bar{b}_n = \begin{cases} 0 & a_n = +1 \\ 1 & a_n = -1 \end{cases}$$

则 $s(t)$ 可表示为

$$s(t) = \sum_n b_n g(t - nT_s) \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + \sum_n \bar{b}_n g(t - nT_s) \cos(\omega_2 t + \varphi_2) \quad (2-20)$$

FSK 信号的带宽大约为

$$B = |f_2 - f_1| + 2f_s \quad (2-21)$$

BFSK 可采用包络检波法、相干解调法、非相干解调法等方法解调。BFSK 相位连续时，可采用鉴频器解调，其中相干解调的框图如图 2-18 所示。接收端采用两个带通滤波器，其中中心频率分别为 f_1 和 f_2 ，信号通过带通滤波器后，分别与频率为 f_1 和 f_2 的载波（与发送端的载波相同）相乘，再通过低通滤波器，然后两个支路进行比较判决，如果 f_1 支路的包络强于 f_2 支路，则判为“+1”，反之判为“-1”。

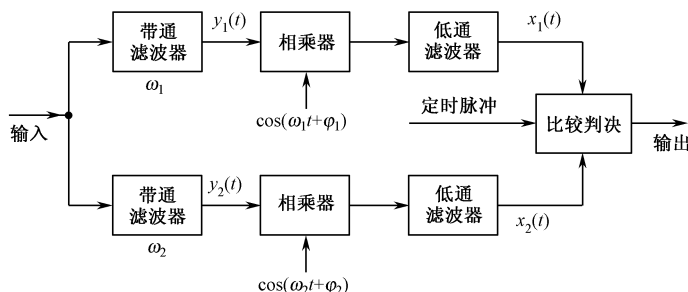


图 2-18 BFSK 相干解调框图

2. 最小移频键控 (MSK)

MSK 是一种特殊形式的 FSK，其频差是满足两个频率相互正交（相关函数等于 0）的最小频差，并要求 FSK 信号的相位连续，其频差 $\Delta f = f_2 - f_1 = 1/2T_b$ ，即调制指数为

$$h = \frac{\Delta f}{1/T_b} = 0.5$$

式中， T_b 为输入数据流的比特宽度。二进制 MSK 的信号表达式为

$$S(t) = \cos \left[\omega_c t + \frac{\pi}{2T_b} a_k t + x_k \right] \quad kT_b \leq t \leq (k+1)T_b \quad (2-22)$$

式中， ω_c 是载波频率； T_b 是输入数据流的比特宽度，即码元宽度； a_k 是第 $k+1$ 个码元中的信息，其取值为 ± 1 ； x_k 是第 k 个码元的相位常数，在时间 $kT_b \leq t \leq (k+1)T_b$ 中保持不变。当 $a_k = +1$ 时，信号 $s(t)$ 的频率为

$$f_2 = \frac{1}{2\pi} \left(\omega_c + \frac{\pi}{2T_b} \right)$$

当 $a_k = -1$ 时，信号 $s(t)$ 的频率为

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \left(\omega_c - \frac{\pi}{2T_b} \right)$$

由此可得频率间隔为

$$\Delta f = f_2 - f_1 = \frac{1}{2T_b}$$

即频差为 $\frac{1}{2T_b}$ 。

所以调制指数为 $h = \Delta f \cdot T_b = \frac{1}{2T_b} \times T_b = \frac{1}{2} = 0.5$ 。

【例 2-6】 采用 MSK 调制，设输入数据速率为 16kbps，载频为 32kHz，试计算其空号和传号对应的频率。

解： 传号对应的频率为

$$f_2 = \frac{1}{2\pi} \left[\omega_c + \frac{\pi}{2T_b} \right] = f_c + \frac{1}{4T_b} = 32 + \frac{16}{4} = 36(\text{kHz})$$

空号对应的频率为

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \left[\omega_c - \frac{\pi}{2T_b} \right] = f_c - \frac{1}{4T_b} = 32 - \frac{16}{4} = 28(\text{kHz})$$

由于 MSK 信号在比特转换时不存在相位的急剧变化，为了满足带宽要求而频带受限时，MSK 信号的包络不会有过零的现象。即使频带受限，包络仍然能够尽量地保持其恒定性。可以在接收机使用硬限幅消除包络上的微小变化，因为幅度恒定，MSK 型号可以使用非线性放大器进行放大。MSK 广泛应用于各种移动通信系统。

MSK 产生框图如图 2-19 所示。基带信号先进行差分编码，然后串/并变换，把一路信号变成两路，码元宽度变为原来的两倍。同相支路再分别与 $\cos\left(\frac{\pi}{2T_b}t\right)$ 及载波 $\cos\omega_c t$ 相乘，正交支路先延时半个码元宽度，再分别与 $\sin\left(\frac{\pi}{2T_b}t\right)$ 和载波 $\sin\omega_c t$ 相乘。最后两路信号合并就得到了 MSK 调制信号。

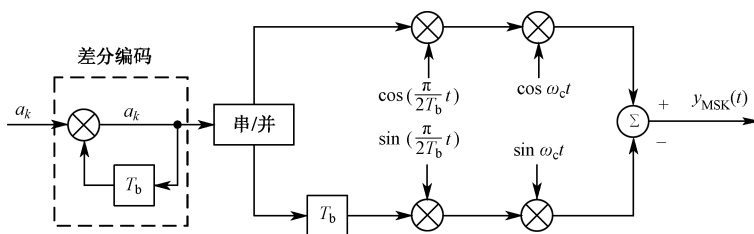


图 2-19 MSK 产生框图

MSK 信号也可以将非归零的二进制序列直接送入 FM 调制器中来产生，这里要求 FM 调制器的调制指数为 0.5。MSK 信号可以采用鉴频器解调，也可以采用相干解调。与 FSK 性能相比，MSK 的输出信噪比提高了一倍。

3. 高斯滤波的最小移频键控 (GMSK)

MSK 虽然具有包络恒定、带宽较窄和较好的误比特率等特点，但它的频谱利用率较低，仍不能满足功率谱在相邻频道取值（邻道辐射）低于主瓣峰值 60dB 的要求。这就要求在保持 MSK 基本特性的基础上，对 MSK 的带外频谱特性进行改进，使其衰减速度加快。

MSK 信号可由 FM 调制器产生，由于输入二进制非归零脉冲序列具有较宽的频谱，从而

导致已调信号的带外衰减较慢。如果将输入信号滤波以后，再送入 FM 调制，必然会改善已调信号的带外特性。

高斯滤波的最小移频键控（GMSK）信号，就是通过 FM 调制器前加入高斯低通滤波器（称为预调制滤波器）而产生的，如图 2-20 所示。低通滤波可以滤除已调信号中的高频分量，有效抑制 MSK 的带外辐射，从而提高其频谱利用率。GMSK 调制方式在移动通信系统中得到了广泛应用，GSM 系统采用的就是 GMSK 调制方式。低通滤波器的选择原则是：应该具有窄的带宽和尖锐的过渡带；低峰突的冲激响应；保持输出脉冲的面积不变，以保证 $\pi/2$ 的相移。为满足上述要求，高斯滤波器就是合适的选择。

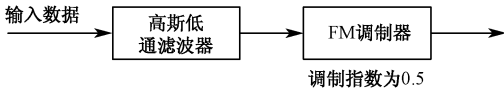


图 2-20 GMSK 信号形成原理图

GMSK 通过引入可控的码间干扰（部分响应波形），来达到平滑相位路径的目的，消除了 MSK 相位路径在码元转换时刻产生的相位转折点。而且 GMSK 信号在一码元周期内的相位增量不像 MSK 那样固定为 $\pm\pi/2$ ，而是随着输入序列的不同而不同。

GMSK 信号的解调可以用与 MSK 一样的正交相干解调电路。在相干解调中最为重要的是相干载波的提取，这在移动通信环境中是比较困难的，因而通常采用差分解调和鉴频器解调等非相干解调。差分检测解调 GMSK 的原理框图如图 2-21 所示。接收端信号通过中频滤波器后，再通过二比特差分检测器，然后通过低通滤波器，最后进行取样判决。对检测器设置一个判决门限，当信号高于门限值时判为“+1”，否则判为“-1”。

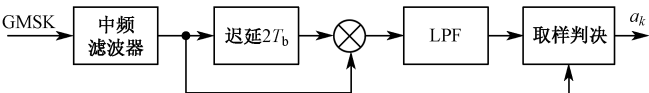


图 2-21 差分检测解调 GMSK 原理框图

2.4.3 数字相位调制

1. 移相键控（BPSK）

二进制移相键控（BPSK）利用载波的相位变化来传递数字信息，振幅和频率保持不变。在二进制移相键控（BPSK）中，通常用初始相位 0 和 π 分别表示二进制数“1”和“-1”。

设输入数字序列为 $\{a_n\}$ ， $a_n = \pm 1$ ， $n = -\infty \sim +\infty$ ，则 BPSK 信号形式为

$$S(t) = \begin{cases} A\cos(\omega_c t) & a_n = +1 \\ -A\cos(\omega_c t) & a_n = -1 \end{cases} \quad nT_b \leq t < (n+1)T_b \quad (2-23)$$

即当输入为“+1”时，对应的信号附加相位为 0；当输入为“-1”时，对应的信号附加相位为 π ，如图 2-22 所示。这种以载波的不同相位直接去表示相应二进制数字信号的调制方式，称为二进制绝对相移方式。

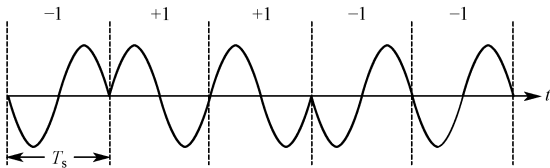


图 2-22 BPSK 信号的时间波形图

BPSK 信号的调制原理框图如图 2-23 所示, 图 2-23 (a) 所示是模拟调制方法, 把输入的基带信号通过码型变换变为双极性不归零码, 然后与初相位为零的载波直接相乘得到 BPSK 已调信号 $s(t)$ 。图 2-23 (b) 所示是移相键控法, 输入的基带信号先通过一个开关电路, 开关的位置分别对应着余弦载波的两个初相位 0 和 π , 这由输入的基带信号决定, 输入“+1”时, 输出 $\cos(\omega_c t)$, 输入“-1”时, 输出 $\cos(\omega_c t + \pi)$, 从而得到 BPSK 已调信号。

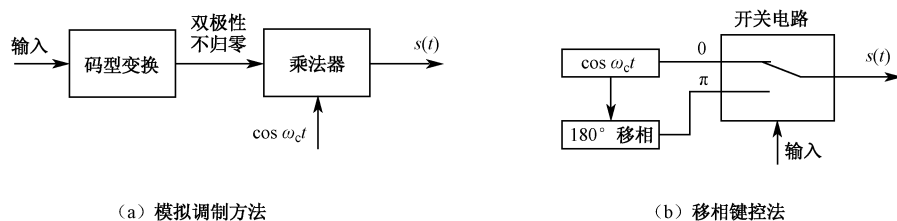


图 2-23 BPSK 信号的调制原理框图

BPSK 可采用相干解调和差分相干解调, 解调器的组成框图如图 2-24 所示。

采用相干解调时, 假设相干载波的基准相位与 BPSK 信号的调制载波的基准相位一致 (通常默认为 0 相位)。但由于在 BPSK 信号的载波恢复过程中存在着相位模糊, 即恢复的本地载波与所需的相干载波可能同相, 也可能反相, 这种相位关系的不确定性, 将会造成解调出的数字基带信号与发送的数字基带信号正好相反, 即“1”变为“-1”, “-1”变为“1”, 判决器输出数字信号全部出错。这种现象称为 BPSK 方式的“倒 π ”现象或“反相工作”。这是 BPSK 方式在实际中很少采用的主要原因。另外, 在随机信号码元序列中, 信号波形有可能出现长时间连续的正弦波形, 致使在接收端无法辨认信号码元的起止时刻。为了解决上述问题, 可以采用差分移相键控 (DPSK) 体制。

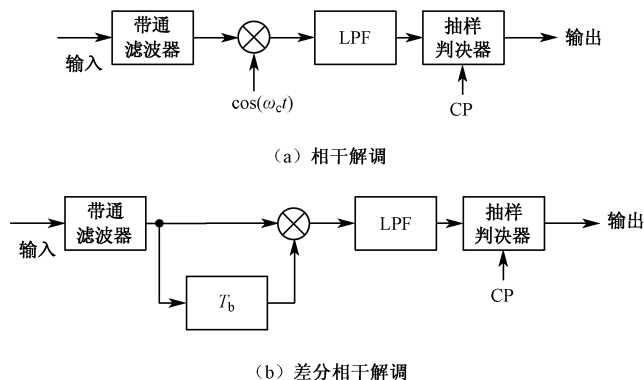


图 2-24 BPSK 的解调框图

在二进制差分移相键控 (2DPSK) 中, 2DPSK 利用前后相邻码元的载波相对相位变化传递数字信息, 所以又称为相对移相键控, 如图 2-25 所示。即先对二进制数字基带信号进行差分编码, 把表示数字信息序列的绝对码变换成相对码 (差分码), 然后再根据相对码进行绝对调相, 从而产生二进制差分移相键控信号。

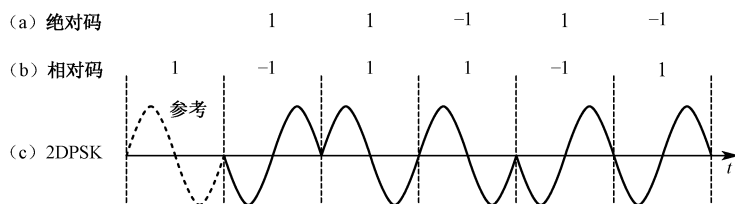


图 2-25 2DPSK 信号的产生

2DPSK 信号调制器原理方框图如图 2-26 所示，输入的基带信号先进行差分码型变换，把绝对码变为相对码，再进行移相键控，开关电路输出的就是 2DPSK 已调信号。

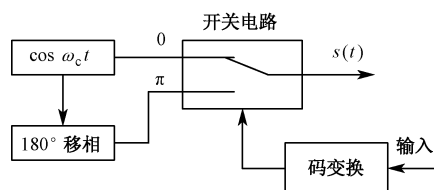


图 2-26 2DPSK 信号调制器原理方框图

2DPSK 信号的解调可以采用相干解调和差分相干解调（相位比较）法。差分相干解调框图如图 2-27 所示。接收端的已调信号先通过带通滤波器，然后进行差分检测，再通过低通滤波器滤除高频分量，最后进行抽样判决，高于判决门限值的判为“+1”，否则判为“-1”。

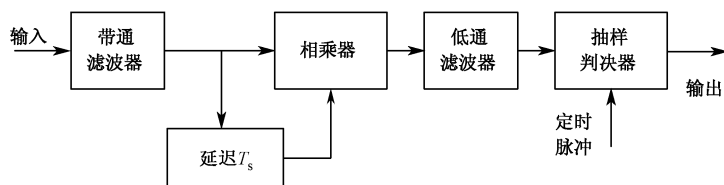


图 2-27 2DPSK 差分相干解调框图

2. 四相移相键控 (QPSK)

四相移相键控是四进制 PSK，也称正交移相键控 (QPSK)，是 MPSK 调制中最常用的一种调制方式，在 CDMA2000 系统的前向信道中就使用了 QPSK 调制方式。由于在一个调制码元中传输两个比特，因此 QPSK 比 BPSK 的带宽效率高两倍。

QPSK 信号产生原理如图 2-28 所示，假定输入二进制序列为 $\{a_n\}$ ， $a_n = +1$ 或 -1 ，则在 $kT_s \leq t < (k+1)T_s$ ($T_s = 2T_b$) 的区间内，令 $n = 2k+1$ ，QPSK 的产生器的输出为

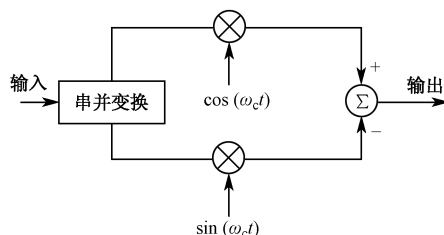


图 2-28 QPSK 信号产生原理图

$$S(t) = \begin{cases} A \cos\left(\omega_c t + \frac{\pi}{4}\right) & a_n a_{n-1} = +1+1 \\ A \cos\left(\omega_c t - \frac{\pi}{4}\right) & a_n a_{n-1} = +1-1 \\ A \cos\left(\omega_c t + \frac{3}{4}\pi\right) & a_n a_{n-1} = -1+1 \\ A \cos\left(\omega_c t - \frac{3}{4}\pi\right) & a_n a_{n-1} = -1-1 \end{cases} \quad (2-24)$$

载波的相位为 4 个间隔相等的值, 即 $\pm\pi/4$ 、 $\pm3\pi/4$ 或 0 、 $\pm\pi/2$ 、 π , 每个相位都与唯一的信息比特组相对应, 如表 2-3 所示。在 QPSK 的码元速率与 PSK 的比特速率相等的情况下, QPSK 是两个 PSK 信号之和, 因而它具有和 PSK 相同的频谱特征和误比特率性能。但在同样的带宽内, QPSK 传输了两倍的数据, 与 2DPSK 相比, QPSK 在同样的能量效率情况下, 提供了两倍的频谱效率。

表 2-3 不同比特组对应载波相移

相 位	$\pi/4$	$-\pi/4$	$3\pi/4$	$-3\pi/4$
比特组	+1, +1	+1, -1	-1, +1	-1, -1

3. $\pi/4$ -DQPSK 调制

由上文可知, QPSK 的最大相位跳变为 $\pm\pi$, 而且 QPSK 只能用相干解调的方式来获取基带信号。 $\pi/4$ -DQPSK 对 QPSK 信号进行了改进, 一是将最大相位跳变降为 $\pm3\pi/4$, 从而改善了 $\pi/4$ -DQPSK 的频谱特性; 二是 $\pi/4$ -DQPSK 既可以用相干解调, 也可以采用非相干解调。 $\pi/4$ -DQPSK 可以避免相干解调时相干载波的相位模糊问题, 而且大大简化了接收机的设计。 $\pi/4$ -DQPSK 已应用于日本的数字蜂窝系统 (PDC)、美国的 IS-136 数字蜂窝系统和个人接入通信系统 (PACS) 中, 其 $\pi/4$ -DQPSK 调制器的原理框图如图 2-29 所示。

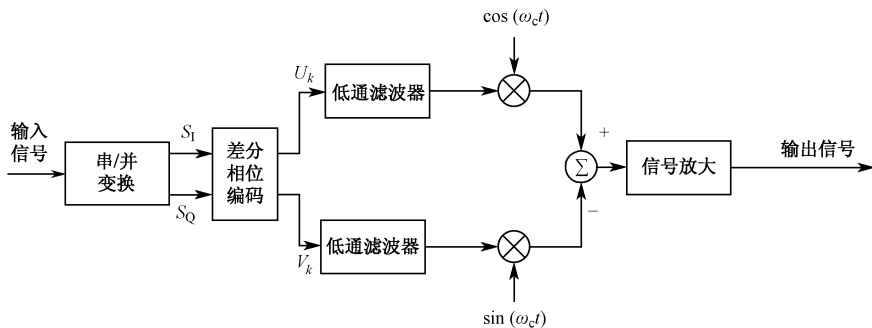


图 2-29 $\pi/4$ -DQPSK 调制器原理框图

输入数据信号经串/并变换之后得到同相通道 I 和正交通道 Q 的两种非归零脉冲序列 S_I 和 S_Q 。通过差分相位编码, 使得在 $kT_s \leq t < (k+1)T_s$ 时间内, I 通道的信号 U_k 和 Q 通道的信号 V_k 发生相应的变化, 再分别进行正交调制之后, 合成为 $\pi/4$ -DQPSK 信号。这里 T_s 是 S_I 和 S_Q 的码宽, $T_s = 2T_b$ 。为了使已调信号功率谱更加平滑, 对图 2-29 中的低通滤波器的特性应有一定的要求。美国的 IS-136 数字蜂窝网中, 规定这种滤波器应具有线性相位特性和平方根升余弦的频率响应。

前一码元两正交信号 U_{k-1} 、 V_{k-1} 与当前码元两正交信号 U_k 、 V_k 之间的关系取决于当前码元

的相位跳变量 $\Delta\theta_k$ ，而当前码元的相位跳变量 $\Delta\theta_k$ 则又取决于差分相位编码器的输入码组 S_I 、 S_Q ， $\pi/4$ -DQPSK 的相位跳变规则如表 2-4 所示。

表 2-4 $\pi/4$ -DQPSK 的相位跳变规则

S_I	S_Q	$\Delta\theta_k$	$\cos\Delta\theta_k$	$\sin\Delta\theta_k$
1	1	$\pi/4$	$1/\sqrt{2}$	$1/\sqrt{2}$
-1	1	$3\pi/4$	$-1/\sqrt{2}$	$1/\sqrt{2}$
-1	-1	$-3\pi/4$	$-1/\sqrt{2}$	$-1/\sqrt{2}$
1	-1	$-\pi/4$	$1/\sqrt{2}$	$-1/\sqrt{2}$

上述规则决定了在码元转换时刻的相位跳变量只有 $\pm\pi/4$ 和 $\pm3\pi/4$ 四种取值。同时也可以看到， U_k 和 V_k 只可能有 0、 $\pm1/\sqrt{2}$ 、 ±1 五种取值。

$\pi/4$ -DQPSK 是一种线性调制，它具有较高的频谱利用率，但其包络不恒定。若在发射过程中采用非线性功率放大器，将会使已调信号的频谱展宽，从而降低了频谱利用率，不能满足对相邻信道的干扰功率电平比本信道的功率电平低 60~70dB 的要求。若采用线性功率放大器，则其功率效率较差。

$\pi/4$ -DQPSK 信号可分别用相干检测、差分检测和鉴频器检测进行解调。由于硬件实现比较方便，经常采用差分检测技术。在 AWGN（加性高斯白噪声）信道中，差分检测 $\pi/4$ -DQPSK 的误码率（BER）比 QPSK 低 3dB，而相干解调的 $\pi/4$ -DQPSK 与 QPSK 有同样的误码性能。在低比特率、快速瑞利衰落信道中，由于不依赖于相位同步，所以差分检测形成的误码率较低。

图 2-30 给出了中频差分检测器框图。在中频差分检测中，输入的 $\pi/4$ -DQPSK 信号先变频到中频信号 S_k ，然后进行带通滤波，通过使用延迟线 T_s 和两个鉴相器进行差分解调，而不需要本地振荡器，带通滤波器与发送的脉冲波形匹配，载波相位保持不变，噪声功率降到最小。两条支路的信号通过滤波后被硬限幅去除包络的波动，硬限幅保留了输入信号相位的变化，所以没有丢失信息。

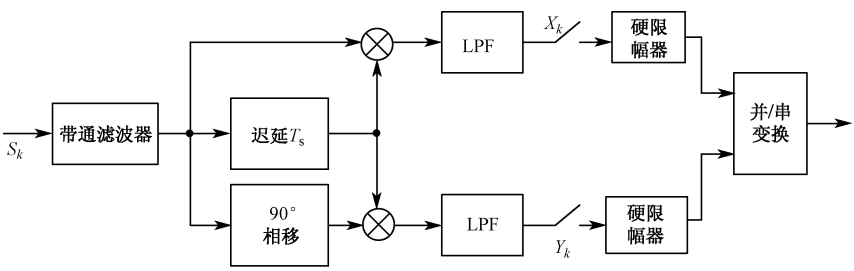


图 2-30 中频差分检测器框图

鉴频器检测框图如图 2-31 所示。输入信号经过平方根升余弦滚降的带通滤波器后进入硬限幅器，再通过鉴频器提取出接收信号瞬时频率的变化，并在每个码元周期内积分，再通过清除电路后，用模为 2π 的检测器可以得到两个抽样时刻间的相位差，最后判决出所传输的数据，模为 2π 的检测器可提高误码性能并降低门限噪声的影响。

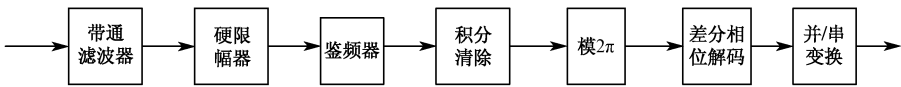


图 2-31 鉴频器检测框图

2.4.4 MQAM 调制

在多进制 PSK (如 QPSK) 调制中, 传输信号的幅度保持为恒定值。多进制正交振幅调制 (MQAM) 是多进制 PSK 的进一步推广, 它是通过同时改变相位和振幅以获得更高的频谱效率的一种调制方式, 从而可在限定的频带内传输更高速率的数据。正交振幅调制的一般表达式为

$$y(t) = A_m \cos \omega_c t + B_m \sin \omega_c t \quad 0 \leq t < T_s \quad (2-25)$$

式中, T_s 为码元宽度; M 为 A_m 和 B_m 的电平数, $m=1, 2, \dots, M$ 。上式由两个相互正交的载波构成, 每个载波被一组离散的振幅 $\{A_m\}$ 、 $\{B_m\}$ 所调制, 故称这种调制方式为正交振幅调制。QAM 中的振幅 A_m 和 B_m 可以表示成

$$\left. \begin{aligned} A_m &= d_m A \\ B_m &= e_m A \end{aligned} \right\} \quad (2-26)$$

式中, A 为固定的振幅, (d_m, e_m) 由输入数据确定。 (d_m, e_m) 决定了已调 QAM 信号在信号空间中的坐标点。

QAM 的调制和相干解调框图如图 2-32 所示。图 2-32 (a) 所示为 QAM 调制框, 输入数据经过串/并变换后分为两路, 分别经过 2 电平到 L 电平的变换, 形成 A_m 和 B_m 。为了抑制已调信号的带外辐射, A_m 和 B_m 还要经过预调制低通滤波器, 才分别与相互正交的各路载波相乘。最后将两路信号相加就可以得到已调输出信号 $y(t)$ 。

在接收端, 输入信号与本地恢复的两个正交载波信号相乘以后, 经过低通滤波器 (LPF)、多电平判决、L 电平到 2 电平变换, 再经过并/串变换就得到输出数据, 如图 2-32 (b) 所示。

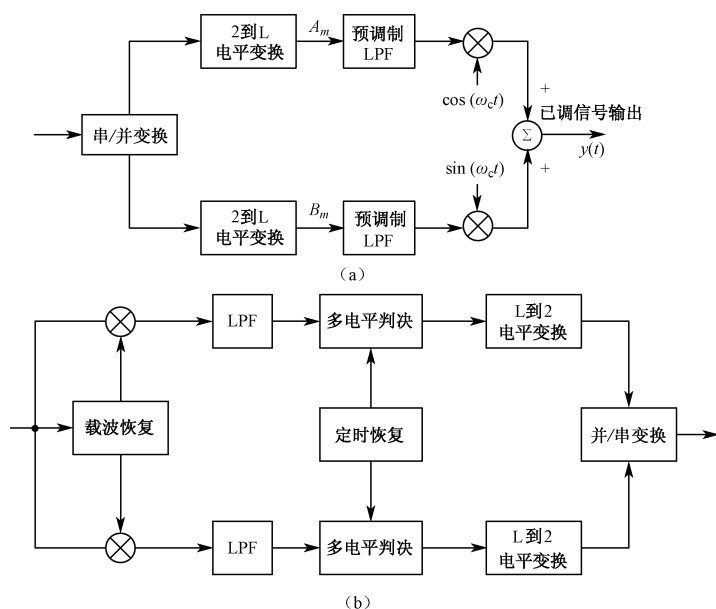


图 2-32 QAM 调制和相干解调原理框图

对 QAM 调制而言, 如何设计 QAM 信号的结构, 不仅影响已调信号的功率谱特性, 而且影响已调信号的解调性能。常用的设计准则是在信号功率相同的条件下, 选择信号空间中信号点之间距离最大的信号结构, 当然还要考虑解调的复杂性。

在实际中, 常用的 QAM 信号的星座图有两种, 一种是方型的, 另一种是星型的, 如图 2-33 和图 2-34 所示。

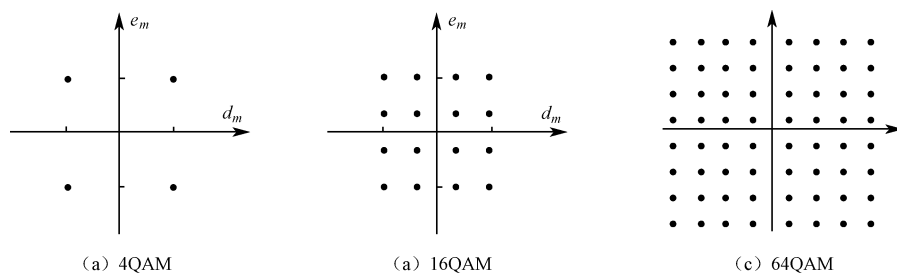


图 2-33 M 进制方型 QAM 星座

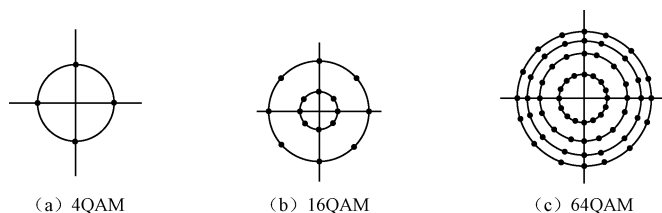


图 2-34 M 进制星型 QAM 星座

比较十六进制方型 QAM (16QAM) 和十六进制星型 (16QAM) 可以发现, 星型 QAM 的振幅环由方型的 3 个减少为 2 个, 相位由 12 种减少为 8 种, 这将有利于接收端的自动增益控制和载波相位跟踪。

QAM 调制信号的功率谱和带宽效率与多进制 PSK 调制信号相同, 而在功率效率方面, QAM 优于多进制 PSK。

2.5

习题

1. 填空题

- (1) 现代移动通信广泛使用的频段是_____和_____, 频率范围在_____至_____ MHz。
- (2) 在移动通信中, 主要的电波传播方式有_____传播、_____传播、_____传播和_____。其中_____为 VHF 和 UHF 频段的主要传播方式。
- (3) 蜂窝移动通信信道是典型的_____信道。(填随参或恒参)
- (4) 当移动台在运动中通信时, 接收信号的频率会发生变化, 这称为_____。由于移动而引起的接收信号的附加频移称为_____。
- (5) 用于描述移动信道时间色散特性的两个参数是_____和_____。
- (6) 某市区实测最大时延 $\tau_{\max}=3.0\mu\text{s}$, 则相关带宽为_____。
- (7) 在 FSK 调制中, 若两个正弦载波的频率分别是 f_1 和 f_2 , 基带信号的带宽是 f_s , 则 FSK 信号的带宽为_____。
- (8) $\frac{\pi}{4}$ -DQPSK 的最大相位跳变为_____。

2. 是非判断题 (正确画√, 错误画×)

- (1) 自由空间中电波传播损耗仅与电波的传播距离有关, 而与电波频率无关。 ()

- (2) 相关时间是信道冲激响应维持不变的时间间隔的统计平均值。 ()
- (3) 时延扩展描述了角度功率谱在空间上的色散程度。 ()
- (4) 均衡技术可以减弱或克服码间干扰的影响。 ()

3. 选择题 (将正确答案的序号填入括号内)

- (1) 下列 () 技术不属于抗信道衰落技术。
A. 分集接收技术 B. 纠错编码技术 C. 均衡技术 D. 语音压缩技术
- (2) 下列 () 码的监督码元不仅与本组的信息元有关, 而且还与前面若干组有关。
A. 循环码 B. 卷积码 C. 奇偶校验码 D. 线性分组码
- (3) 下列 () 调制技术是线性调制技术。
A. QPSK B. MSK C. GFSK D. GMSK
- (4) PSK 信号的带宽是基带脉冲波形带宽的 () 倍。
A. 1 B. 2 C. 3 D. 4

4. 简答题

- (1) 什么叫调制? 移动通信系统对数字调制技术有哪些要求?
- (2) 简述 BFSK 相干解调原理。
- (3) 产生“倒 π 现象”的原因是什么? 怎样消除该现象?

5. 计算题

- (1) 在标准大气折射下, 发射天线高度为 150m, 接收天线高度为 1m, 则视距传播极限距离为多少?
- (2) 若载波频率 $f_0=900\text{MHz}$, 移动台运动速度 $v=100\text{km/h}$, 则最大多普勒频移为多少?
- (3) 移动台的移动速度为 50km/h , 信道的载频为 1.8GHz , 则相关时间为多少?
- (4) MSK 调制中, 设输入的数据速率为 64kbps , 载频为 32kHz , 则其空号和传号对应的频率分别为多少?

>>> 调研项目: 移动通信技术的应用研究



调研目的:

1. 通过调研, 了解我国移动通信技术的应用领域及现状。
2. 了解目前我国移动通信技术应用水平及其应用状况。
3. 增强对移动通信技术的感性认识, 提高读者学习移动通信技术的积极性, 了解移动通信技术在通信领域中的地位和作用。



调研要求:

1. 在调研的基础上, 要按统一要求格式撰写 5 000 字左右的《关于我国移动通信技术的应用领域及现状》调查研究报告。

2. 调研资料要真实、可靠, 论证要清晰、准确。报告中, 重点阐述当前我国移动通信技术的应用情况及其现状, 并对其未来发展作一展望。

**提示:**

可利用图书馆、互联网等查阅有关资料, 在有条件的情况下, 可到有关科研院所、企业、公司进行调研。

实验 2 接收机、噪声与电波传播损耗

**实验目的:**

1. 了解超外差接收机电路及其特点, 以及接收机内部及外部噪声。
2. 了解电波传播损耗。
3. 了解接收机灵敏度和大信号信噪比。

**实验方法:**

1. 课前仔细阅读实验指导书, 掌握移动通信设备的面板结构, 了解有关测量仪器的使用方法。
2. 根据实验指导书的说明, 结合实验设备, 在老师的指导下, 进行实验数据的测量。
3. 用示波器测量接收机输出 S/N 、接收机输出噪声、接收机灵敏度、接收机大信号信噪比。
4. 注意实验过程中观察到的现象, 做好数据记录, 并进行分析。

>>> 第 3 章

组网技术

- 🏠 3.1 蜂窝移动通信基本概念
- 🏠 3.2 移动通信的多址技术
- 🏠 3.3 区域覆盖和频率分配
- 🏠 3.4 蜂窝移动通信中的信令技术
- 🏠 3.5 移动通信网络结构
- 🏠 3.6 越区切换与位置管理
- 🏠 3.7 习题

移动通信网的网络布局结构直接影响着通信系统的容量、频率资源的利用率和通信质量等指标。早期的移动通信系统，在其覆盖区域中心设置大功率发射机，采用高架天线把信号发送到半径可达几十千米的整个区域（大区制）。这种系统致命的弱点是只能同时提供极为有限的信道给用户。大区制早已不能满足全球移动通信用户数量的爆炸式增长。例如，20 世纪 70 年代在美国开通的 IMTS（Improved Mobile Telephone Service）系统，其组成结构如图 3-1 所示，仅能提供 12 对信道，也就是说只能允许 12 对用户同时通话，如果第 13 对用户要求通话，就会发生堵塞。

蜂窝技术是现代移动通信的基础，是解决频率资源限制和用户容量问题的重大突破。该技术是由美国贝尔实验室最早提出的。它巧妙地利用了频率复用技术，在有限的频谱上提供非常大的容量，却不需要在技术上做出重大的改变。

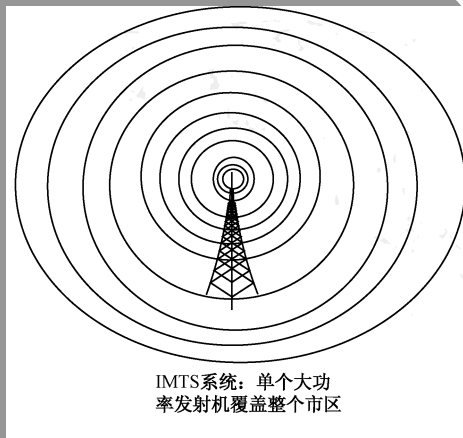


图 3-1 IMTS 系统

3.1

蜂窝移动通信基本概念

蜂窝组网技术并没有采用点对点传输和广域覆盖的模式，而是将一个移动通信服务区划分

成很多正六边形小区，以此为基本几何图形的小覆盖区域（蜂窝小区）。

3.1.1 提高频率资源利用率

每个蜂窝小区都有自己的基站，基站的小功率发射机只将自己的小区域覆盖，且仅为自己的小区提供服务，每个蜂窝小区被分配一组频率，其结构如图 3-2 所示。通常，相邻的蜂窝小区被分配另外一组不同的工作频率，目的是避免相同频率发生相互干扰。由于每个蜂窝区基站的发射功率较小，当无线电波的能量在传播中损耗到足够微弱时，在距离足够远的另外一个基站即使重复使用相同的一组工作频率，也不会产生干扰，从而有效地进行了频率复用。

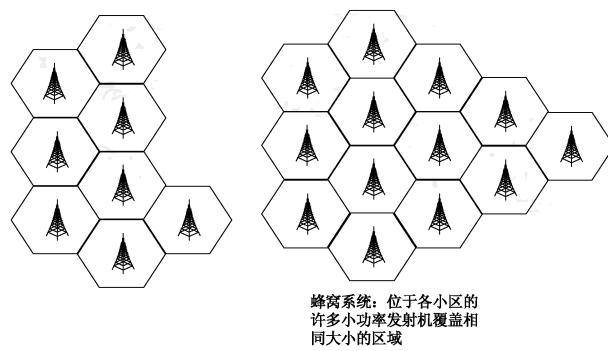


图 3-2 蜂窝系统结构图

1. 正六边形小区结构

正六边形对移动通信网络是非常完美的几何图形，不仅可以像蜂窝一样覆盖任何形状的服务地区，还可以提供邻接小区等距的天线机构。而当小区模型为其他形状时，很可能达不到这样的效果。例如，当小区模型为正四边形时，相邻小区的天线距离可能不相等，如图 3-3（a）中所示的 d_1 和 d_2 ；而与之对比，如图 3-3（b）所示正六边形的半径被设定为它的外接圆半径，即从正六边形中心到各个顶点的距离，其值也等于正六边形各个边的长度。对于一个半径为 R 的蜂窝区，其中心到每个邻接蜂窝小区中心的距离 $d = \sqrt{3}R$ 。图 3-4 描述了一个 $N=4$ 的频率复用模型。整个蜂窝无线通信系统的全部工作频率被分为 4 个各不相同、各自独立的频率组，共同使用全部频率的 N 个小区叫做区群（Cluster，也称簇）。 N 为区群的大小，也就是区群中的小区个数，在本例中区群的大小为 4。在相邻的蜂窝区内使用不同组的工作频率，能使用同组频谱的蜂窝小区中心之间的距离为 D ，如图 3-4 所示。

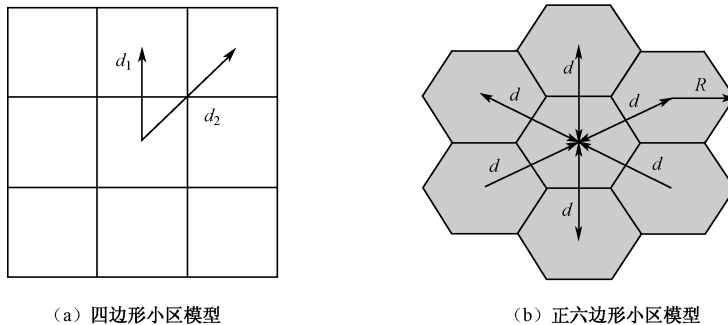
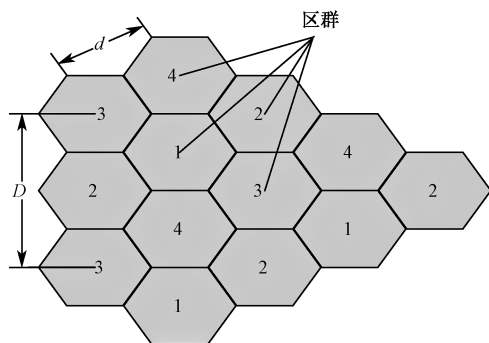


图 3-3 小区模型示意图

图 3-4 $N=4$ 频率复用小区模型

蜂窝技术大大增加了移动无线网络的可用容量, 比如, 一个拥有一百万用户的大城市, 如果给每一个用户分配一个频率, 则需要极大的频谱资源, 且在话务繁忙时还可能饱和。频率复用能够从有限的原始频率分配中产生几乎无限的可用频率, 可以在不同的蜂窝区内允许多个并发进行的通话使用相同的频率, 大大缓解频谱资源紧缺的问题, 增加了用户的数量和系统的容量。

2. 减小蜂窝小区干扰的措施

蜂窝小区的设计中, 需要注意的问题是如何有效避免干扰, 干扰是蜂窝系统性能的主要限制因素。干扰源可能来自同一小区的其他移动设备 (如手机)、相邻小区正在进行的通信、使用相同频率的其他基站的同频干扰, 还有可能是其他非蜂窝系统无意中渗入蜂窝系统的频带范围。

蜂窝移动通信网络中存在着许多使用同一组工作频率的小区, 这些小区之间的信号干扰称为同频干扰 (也称为同道干扰)。对于同频干扰, 不能像克服热噪声那样通过增大信噪比来解决, 也不能简单地增大发射机的发射功率, 因为这样反而会增大同频干扰。减少同频干扰的方法是将同频小区隔开一个合理的距离, 而这个距离的确定与小区半径和同频小区之间的距离的比值有关。在每个蜂窝区的大小相近, 每个基站的发射功率也相同的情况下, 小区半径 R 与同频小区中心距离 D 的比值 Q 有如下函数关系, 即

$$Q = D/R = \sqrt{3N} \quad (3-1)$$

式中, Q 为同频干扰抑制因子; N 为区群大小, 这里也称 N 为复用因子。当 D/R 的值增加时, 同频小区的空间距离相对增加, 所以来自同频小区的射频能量将减少, 从而干扰也将减小。

来自相邻频率的信号干扰称为邻频干扰。邻频干扰是由于接收机滤波器的滤波特性不理想而造成的, 也就是相邻频道的信号渗透到传输带宽中, 因此可以通过精确设计滤波器和信道分配策略, 使其干扰减小。将连续的信道分配给不同的小区, 使小区内的信道频率间隔尽可能地大。

3.1.2 蜂窝移动电话的工作过程

在每个蜂窝小区的点中心设置一个基站, 基站包括一副天线、一个控制器和大量的收/发信机。其中控制器用于处理移动单元和网络其余部分的呼叫过程。在任一时刻, 可能有大量活跃的移动台 (如手机) 在一个蜂窝区内移动并与基站联络。每个基站 (BS) 都连接到一个移动电话交换局 (MSC), 每个 MSC 为多个基站提供服务。通常, MSC 与基站之间的链路是有线链路, 当然用无线链路也是可以的。MSC 连接并处理移动设备之间的业务, 同时, MSC 也连

接到公共电话或电信网络,且能够连接公用网的固定用户和蜂窝式网络的移动用户。MSC 为每个呼叫分配语音信道,执行越区切换,并根据计费信息监控呼叫,图 3-5 所示为蜂窝式移动电话系统的工作示意图。

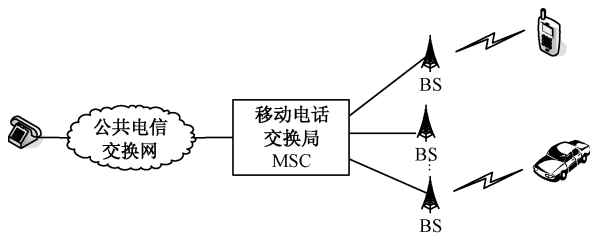


图 3-5 蜂窝式移动电话系统的工作示意图

1. 移动电话的呼叫流程

移动电话完成一次呼叫通话的流程如下。

(1) 移动设备初始化。蜂窝系统在不同的信道上反复广播,当移动设备(如手机)打开时,扫描该蜂窝系统所使用的控制信道,选择最强信号的信道建立控制信道并监控该信道。移动设备在它将要工作的蜂窝区中自动寻找基站天线。由于移动设备的移动状态,只要移动设备开机,该扫描过程将周而复始地重复进行,一旦移动设备进入新的蜂窝小区,则选取新的基站。

(2) 移动设备发起呼叫。通过在预选的信道上发送被叫设备的号码,移动设备发起一次呼叫,通过下行链路(基站向移动台)的校验信息,移动设备的接收器检测信道是否空闲。当检测到一条空闲信道时,移动设备会在相应的上行链路(移动台向基站)上发射请求信号,基站将请求信号送至 MSC。

(3) 寻呼。MSC 根据被叫移动设备号码,将寻呼消息发送给某些基站,每个基站在自己所分配的信道上发射寻呼信号。

(4) 接收呼叫。被叫移动设备在被监控的信道上认出它的号码并向基站做出响应,该基站将响应送往 MSC, MSC 将在主信道与被叫信道之间建立一条电信链路。同时, MSC 在每个基站所在蜂窝区中选择一个可用信道,并通知每个基站,这些基站将依次通知它们的移动台。将这两个移动台调至在它们各自分配的业务信道上。

(5) 继续呼叫。当连接继续时,两个移动设备通过各自的基站与 MSC 交换语音或数字信号。

(6) 越区切换。如果在连接过程中,一个移动设备越出一个蜂窝小区后进入另一个蜂窝小区的范围,业务信道不得不改为新蜂窝区中一条已分配给基站的信道,系统在不需切断呼叫的情况下,完成这次连接更改。

(7) 结束呼叫。当两个用户之一挂机时, MSC 收到信息,释放两个基站的业务信道。

2. 意外情况的发生

在呼叫中有可能发生以下意外情况:

(1) 呼叫阻塞。在移动设备初始化阶段,如果所有分配给最近基站的业务信道都没有空闲,则该设备反复尝试预先设定号码。经过几次呼叫失败后,将忙音返回用户。

(2) 掉话。在连接过程中,由于在某些地区存在干扰或信号太弱等现象,基站无法在某段时间内维持所需要的最小信号强度,通向用户的业务信道会被关闭,造成掉话现象的发生,并告知 MSC。

3.2

移动通信的多址技术

蜂窝系统是以不同的信道来区分通信对象的, 一个信道在同一时间内, 只能被一对进行通话的用户占用。用户以不同的信道来互相区分彼此的情况称为多址。

3.2.1 多址接入方式

绝大多数情况下, 移动通信系统是一个多信道同时工作的系统, 系统中的基站要和许多移动台同时通信。基站通常有多个信道, 而每个移动台只供一对用户使用, 只能在通话时占用一个信道, 这就形成了移动通信中基站多路工作和移动台单路工作的特点。当有多个用户同时通话时, 以不同的信道分隔以防止互相干扰。在移动通信业务区内, 移动台之间或移动用户与市话用户之间通过基站同时建立各自的信道, 从而实现多址连接。

常见的多址方式有 3 种, 当以传输信号的载波频率不同来区分信道建立多址接入时, 称为频分多址方式 (FDMA); 当以传输信号的时间不同来区分信道建立多址接入时, 称为时分多址方式 (TDMA); 当以传输信号的码型不同来区分信道建立多址接入时, 称为码分多址方式 (CDMA)。图 3-6 分别示出了 N 个信道的 FDMA、CDMA 和 TDMA 的示意图。

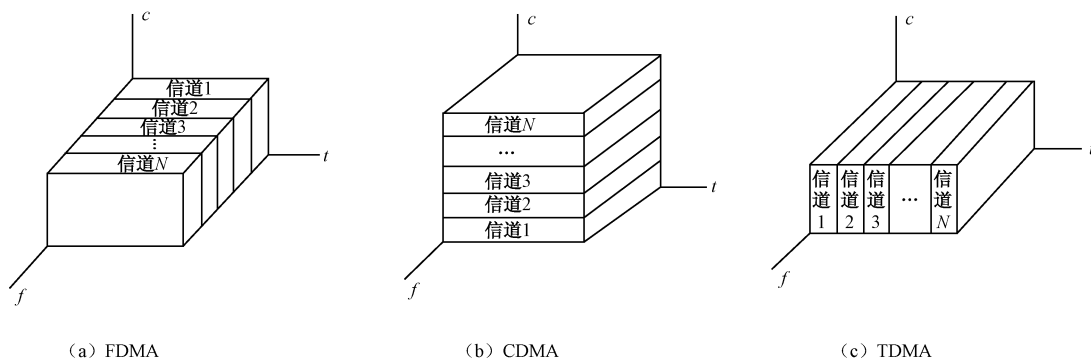


图 3-6 FDMA、CDMA 和 TDMA 的示意图

3.2.2 频分多址 (FDMA) 方式

频分多址 (Frequency Division Multiple Access, FDMA) 是指将给定的频谱资源划分为若干等间隔的信道 (或称为频道), 供给不同的用户使用。

1. 信号的链路形成

在早期的模拟移动通信系统中, 信道带宽通常等于传输一路模拟语音所需要的带宽 (如 25kHz 或 30kHz)。在单纯的 FDMA 系统中, 通常采用频分双工系统 (Frequency Divide Duplex, FDD) 的工作模式, 系统为每一对用户分配一个信道, 即一对频谱。其中一个频谱用做前向信道, 即基站 (BS) 向移动台 (MS) 方向的信道 (也叫下行链路), 另一个则用做反向信道, 即移动台向基站方向信道 (也叫上行链路)。

这种通信系统的基站需要同时发送和接收不同频率的信号, 其信道传输过程如图 3-7 所示。FDMA 系统的收、发频段是分开的, 即接收频率 f 和发送频率 F 是不同的。为了防止同一

部电台的收、发之间产生干扰，收、发频率间隔 $|f - F|$ 必须大于一定的数值。例如，在 800MHz 的频段，收、发频率间隔为 45MHz。

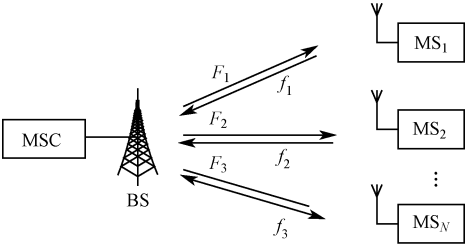


图 3-7 FDMA 系统工作示意图

典型的 FDMA 系统的频谱分割如图 3-8 所示，前向信道占有较高的频段，反向信道占有较低的频段，中间为保护频带。为了防止系统频率漂移造成信号带宽的重叠，在用户频道之间设有频率保护间隙 F_g 。前向与反向信道的频道分割是为了实现频分双工通信的要求。只要频道之间的保护频带（如 25kHz 或 30kHz）足够大，就可以保证信号的带宽不会重叠。

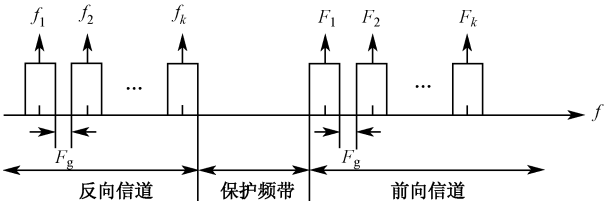


图 3-8 FDMA 系统的频谱分割示意图

2. 话务量

移动通信的频率资源十分紧张，不可能为每一个移动台预留一个信道，只能为每个基站预留一组信道，供给该基站所覆盖的小区内所有移动台共用。在多信道共用的情况下，一个基站若有 n 个信道为小区的全部移动用户所共有，当其中 k ($k < n$) 个信道被占用后，其他用户可以按照呼叫的先后顺序来占用剩下的 $(n - k)$ 个信道，但是基站最多可保障 n 对用户同时进行通话，如果再有新的呼叫用户便不能接入。这种情况发生的概率有多大呢？这就需要了解话务量和呼损率的概念，在此简单介绍话务量的概念，并进行定量分析。

在语音通信中，业务量的大小用话务量来度量。话务量分为流入话务量和完成话务量。流入话务量的大小取决于单位时间（h）内平均发生的呼叫次数 λ 和平均每次呼叫持续时间 h 。因此流入话务量 A 为

$$A = \lambda \cdot h \tag{3-2}$$

式中， λ 的单位为次/小时， h 的单位为小时/次，话务量 A 的单位定义为 Erlang（爱尔兰），简称为 Erl。由式（3-2）可以看出，流入话务量 A 是平均一小时内所有呼叫需占用信道的总小时数。如果从一对信道的角度看，1Erl 就代表了每小时内用户要求通话的时间为一小时，这也是一个信道能达到的最大呼叫话务量。由于用户的呼叫是随机的，不可能不间断地连续利用信道，也就是说信道的利用率为 100% 是不可能发生的情况。

【例 3-1】某个通信网中平均每小时有 225 次呼叫，平均每次呼叫的通话时间为 2min，那么这个通信网的流入话务量为多少？

解：平均每次呼叫的通话时间 $h = 2(\text{分/次}) = 2 \times \frac{1}{60} (\text{小时/次}) = \frac{1}{30} (\text{小时/次})$ ；平均每小时

呼叫次数 $\lambda = 225$ ，则由式(3-2)中 $A = \lambda \cdot h$ 可计算，该通信网的流入话务量 $A = 225 \times \frac{1}{30} = 7.5(\text{Erl})$ 。

3. 呼损率

在信道共用的情况下，通信网无法保证每个用户的所有呼叫都能成功，必然会有少量的通话失败，这种情况的发生称为呼损。若已知全网用户在单位时间内平均呼叫次数为 λ ，其中呼叫成功的次数为 λ_0 ($\lambda_0 < \lambda$)，则完成话务量为

$$A_0 = \lambda_0 \cdot h \quad (3-3)$$

其中流入话务量与完成话务量之差，即为损失的话务量，损失话务量占流入话务量的比率称为呼损率，记为 B ，即呼损率 B 为

$$B = \frac{A - A_0}{A} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda} \quad (3-4)$$

显然呼损率越小，成功呼叫的概率就越大，用户就越满意。因此呼损率 B 也称为通信网中的服务等级。例如，某通信网的服务等级为 0.005 ($B=0.005$)，表示在全部呼叫中有 5% 的概率未接通。对于一个通信网来说，要想使呼损率降低，只有让流入话务量减少，也就是少容纳一些用户，但这又是建设通信网所不希望的。可见，呼损率和流入话务量是一对矛盾，在设计通信网时，要寻找一个最佳平衡点。

在实际的通信网络中，人们关心的不是某一个信道的完成话务量，而是全网的完成话务量。通信网中往往有很多信道，其中一部分甚至全部的信道很有可能在同一时间段被占用。设一个通信网总的信道数量为 n ，在观察时间 $T(h)$ 内有 i ($i < n$) 个信道同时被占用的时间为 t_i ($t_i < T$)，那么可以算出实际通话时间为

$$\sum_{i=1}^n i \cdot t_i = 1 \cdot t_1 + 2 \cdot t_2 + 3 \cdot t_3 + \cdots + n \cdot t_n = G \cdot h \quad (3-5)$$

式中， G 为全网的通话次数； h 为全网平均每次通话的时间。则单位时间内全网的完成话务量为

$$A_0 = \frac{1}{T} G \cdot h = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n i \cdot t_i = \sum_{i=1}^n i \cdot \frac{t_i}{T} \quad (3-6)$$

当观察的时间足够长， t_i/T 就表示总信道中有 i 个信道被同时占用的概率，用 P_i 表示，则式(3-6)可以改写为

$$A_0 = \sum_{i=1}^n i \cdot P_i \quad (3-7)$$

由式(3-7)可以看出，完成话务量是通信网同时被占用信道数的统计平均值，它表示了通信网的繁忙程度。

【例 3-2】 某个通信网共有 10 个信道，在下午一时到三时两个小时的观察时间内，统计出 i 个信道同时被占用的时间（小时数）如表 3-1 所示，计算通信网的完成话务总量。

表 3-1 某系统信道同时占用概率统计

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t_i	0.2	0.3	0.4	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1

解：利用式（3-6）可得全网的完成话务量 A_0 为

$$A_0 = \frac{1}{2}(1 \times 0.2 + 2 \times 0.3 + 3 \times 0.4 + 4 \times 0.5 + 5 \times 0.4 + 6 \times 0.3 + 7 \times 0.2 + 8 \times 0.1 + 9 \times 0.1 + 10 \times 0.1)$$

$$= 5.95 \text{ (Erl)}。$$

这个结果说明，在总共 10 个信道中，在 2h 的观察时间内，平均每小时有 5.95 个信道同时被占用，每个信道每小时被占用的时间为 $5.95/10=0.595\text{h}$ 。因为一个信道最大的可容纳的话务量为 1Erl，因此它的平均信道利用率为 59.5%。从这个计算结果来看，似乎利用率不是很高，但要进一步提高利用率就会使呼损率变大。

对于多信道共用的移动通信网，如果满足每次呼叫相互独立，在时间上都有相同的概率，且每个用户选用无线信道是任意的，则其呼损率为

$$B = \frac{A^n/n!}{\sum_{i=1}^n A^i/i!} \tag{3-8}$$

式（3-8）就是电话工程中的第一爱尔兰公式，式中的 3 个参数 B 、 A 和 n 给定任意两个都可以算出第三个参数，是非常实用的公式。在工程中，可根据如表 3-2 所示的爱尔兰呼损表来确定各个参数，在呼损率不同的情况下，信道利用率也是不同的。信道利用率 η 用每小时每信道完成的话务量来计算，即

$$\eta = \frac{A_0}{n} = \frac{A(1-B)}{n} \tag{3-9}$$

表 3-2 爱尔兰呼损表

B	1%	2%	3%	5%	10%	20%	40%
n	A	A	A	A	A	A	A
1	0.010 10	0.020 41	0.030 93	0.052 63	0.111 11	0.250 00	0.666 67
2	0.152 59	0.223 47	0.281 55	0.381 32	0.595 43	1.000 0	2.000 0
3	0.455 49	0.602 21	0.715 13	0.899 40	1.270 8	1.929 9	3.479 8
4	0.869 42	1.092 3	1.258 9	1.524 6	2.045 4	2.945 2	5.021 0
5	1.360 8	1.657 1	1.875 2	2.218 5	2.881 1	4.010 4	6.595 5
6	1.909 0	2.275 9	2.543 1	2.960 3	3.758 4	5.108 6	8.190 7
7	2.500 9	2.935 4	3.249 7	3.737 8	4.666 2	6.230 2	9.799 8
8	3.127 6	3.627 1	3.986 5	4.543 0	5.597 1	7.369 2	11.419
9	3.782 5	4.344 7	4.747 9	5.370 2	6.546 4	8.521 7	13.045
10	4.461 2	5.084 0	5.529 4	6.215 7	7.510 6	9.685 0	14.677
11	5.159 9	5.841 5	6.328 0	7.076 4	8.487 1	10.875	16.314
12	5.876 0	6.614 7	7.141 0	7.950 1	9.474 0	12.036	17.954
13	6.607 2	7.401 5	7.966 7	8.834 9	10.470	13.222	19.598
14	7.351 7	8.200 3	8.803 5	9.729 5	11.473	14.413	21.243
15	8.108 0	9.009 6	9.650 0	10.633	12.484	15.608	22.891
16	8.875 0	9.828 4	10.505	11.544	13.500	16.807	24.541
17	9.651 6	10.656	11.368	12.461	14.522	18.010	26.192
18	10.437	11.491	12.238	13.385	15.548	19.216	27.844
19	11.230	12.333	13.115	14.315	16.579	20.424	29.498
20	12.031	13.182	13.997	15.249	17.613	21.635	31.152

续表

B	1%	2%	3%	5%	10%	20%	40%
n	A	A	A	A	A	A	A
21	12.838	14.036	14.885	16.189	18.651	22.848	32.808
22	13.651	14.896	15.778	17.132	19.692	24.064	34.464
23	14.470	15.761	16.675	18.080	20.737	25.281	36.121
24	15.295	16.631	17.577	19.031	21.784	26.499	37.779
25	16.125	17.505	18.483	19.985	22.833	27.720	39.437

由表 3-2 可以看出, 在给定呼损率 B 的条件下, 随着信道数 n 的增大, 完成话务量 A 不断增长。当 $n < 3$ 时, A 随 n 的增长接近指数规律; 当 $n > 6$ 时, 则接近线性关系。

很显然, 一天 24h 中, 每小时的话务量是不可能相同的。话务量是指用户一天中最忙的几个小时的平均话务量, 用 A_B 来表示, 它是一个统计平均值。同时, 将忙时话务量与全天话务量之比称为集中系数, 用 k 表示, 它代表了忙时话务量占全天话务量的比例, k 一般为 10%~15%。设每一用户每天平均呼叫次数为 G' (次/天), 每次呼叫平均占用信道时间为 T (秒/次), 可得到每个用户最忙时的话务量表达式为

$$A_B = G' \cdot T \cdot k \cdot \frac{1}{3\,600} \quad (3-10)$$

【例 3-3】 某用户每天平均呼叫 3 次 ($G'=3$ 次/天), 每次呼叫平均占用信道时间为 2min ($T=120s$), 集中系数为 10% ($k=0.1$), 则每个用户忙时的话务量为多少?

解: 由题意可知, 该用户每天平均呼叫 $G'=3$ 次/天, 每次呼叫平均占用信道时间为 $T=2min=120s$, 集中系数 $k=0.1=10\%$, 则忙时的话务量为

$$A_B = \frac{G' \cdot T \cdot k}{3\,600} = (3 \times 120 \times 0.1) / 3\,600 = 0.01 \text{ (Erl/用户)}$$

国外资料表明, 公用移动通信网可按照 $A_B=0.01$ 来设计, 专业移动网可按照 $A_B=0.05$ 来设计。由于使用电话的习惯不同, 国内建议公用移动通信网按照 $A_B=0.02 \sim 0.03$ 来设计, 专业移动网按照 $A_B=0.08$ 设计。

在用户忙时话务量确定之后, 每个信道所能容纳的用户数 m 可以表示为

$$m = \frac{A/n}{A_B} = \frac{3\,600 A}{G' \cdot T \cdot k} \quad (3-11)$$

【例 3-4】 设用户忙时话务量 $A_B=0.01$ (Erl/用户), 呼损率 $B=10\%$, 现有 8 个无线信道, 试计算该系统的容量和利用率。如果呼损率为 20%, 容量和利用率有什么变化?

解: (1) 由表 3-2 可以查出 $B=10\%$, $n=8$ 时, $A=5.5971$ Erl, 因此每信道用户容量为 $m = \frac{5.5971}{0.01 \times 8} = 70$ (用户/信道), 该系统的用户容量 $M=m \times n=70 \times 8=560$ (用户), 由式 (3-9) 可得 $\eta = \frac{5.5971 \times (1-0.1)}{8} = 63\%$ 。

(2) 当 $B=20\%$, $n=8$ 时, 查表得到 $A=7.3692$ Erl, 因此每信道用户容量为 $m = \frac{7.3692}{0.01 \times 8} = 92$ (用户/信道), 系统的用户容量为 $M=m \times n=736$ (用户), 由式 (3-9) 可得 $\eta = \frac{7.3692 \times (1-0.2)}{8} = 73.69\%$ 。

由上述结果可以看出, 当呼损率提高后, 全网的容量和效率都提高了, 这就是通信网设计

时要折中考虑的问题。

4. FDMA 系统的几种主要干扰

介绍了有关话务量和呼损率的概念之后,可对多信道共用技术加深理解。影响 FDMA 系统的另一个问题就是干扰。FDMA 系统是基于频道划分为信道的,用户利用一对频道($f \sim F$)进行通信,如果有其他信号串入该用户的反向信道(用户接收机的频带),就会造成干扰。对 FDMA 系统有影响的主要有互调干扰、同频道干扰和邻道干扰。

1) 互调干扰

互调干扰是指系统内由非线性器件产生的各种组合频率成分,落入本频道接收机通带内造成对有用信号的干扰。当干扰强度即功率足够大时,将损害到有用信号。为了克服互调干扰,应尽可能提高系统的线性程度,减少发射机互调和接收机互调。除上述方法外,还应该尽量选用无互调的频率集,这属于 FDMA 蜂窝系统的频率规划问题。

2) 同频道干扰

在蜂窝系统中,同频道干扰是指相邻群区中,同频率信道小区信号造成的干扰。它与蜂窝的结构和频率规划密切相关,需要合理地选定蜂窝结构和频率规划。

3) 邻道干扰

邻道干扰是指相邻频道信号中,存在的寄生辐射落入本频道接收机带宽内造成对信号的干扰。为了克服邻道干扰,必须严格规定收发机相关的技术指标,即规定发射机寄生辐射和接收机中频选择特性。除此之外,加大频道间的隔离度也可有效地减少邻道干扰。

5. FDMA 系统的主要特点

FDMA 系统的主要特点如下。

(1) 每信道占用一个载频,相邻载频之间的间隔应满足传输信号带宽的要求。为了在有限的频谱内增加信道数量,系统都希望间隔越窄越好。FDMA 信道的相对带宽较窄(如 25kHz),每个信道的每一个载波只支持一个电路链接,也就是说 FDMA 通常是在窄带系统中实现的。

(2) FDMA 方式中,每个信道只传输一路数字信号,信号速率一般较低,所以每个符号传输的时间相对较长,由码间干扰引起的误码率极小,因此在窄带 FDMA 系统中无须自适应均衡。

(3) 基站复杂庞大,移动台简单。基站有多少信道就需要重复设置多少收发信设备,同时需要天线共用器,功率损耗大,容易产生信道间的互调干扰。

(4) FDMA 系统每个载波单个信道的设计,使得在接收设备中必须使用带通滤波器,允许指定信道里的信号通过,滤除其他频率信号,从而限制邻近信道间的相互干扰。

(5) 越区切换复杂和困难。在 FDMA 系统中,分配语音信道后,基站和移动台都是连续传输的,所以在越区切换时,必须瞬时中断传输几十甚至几百毫秒的时间,把通信从一个频率切换到另一个频率。这对于语音瞬时中断问题不大,但是对于数据传输将会引起数据丢失。

3.2.3 时分多址(TDMA)方式

时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)是在一个宽带的无线载波上,把时间分成周期性的帧,每一帧再分成若干时隙,无论是帧还是时隙,都不能重叠。

1. TDMA 系统概念

在 TDMA 系统中,每一个时隙就是一个信道,分配给一个用户,其时隙用户结构示意图如图 3-9 所示,每个移动台在一帧中分配了一个特定时隙。系统根据一定的原则分配时隙,各移动台在上行帧内,只能按指定时隙向基站发送信号。为了保证在不同传播时延情况下,各移

动台到达基站处的信号不会重叠,通常上行时隙内必须设有保护间隔,在该间隔内不传送信号。在满足定时和同步的条件下,基站可以在各个时隙中接收到各个移动台的信号而互不干扰。同时,基站发向各个移动台的信号都按顺序安排在预定的时隙中传输,各个移动台只要在指定的时隙内接收,就能在合路信号中把发给它的信号区分出来。

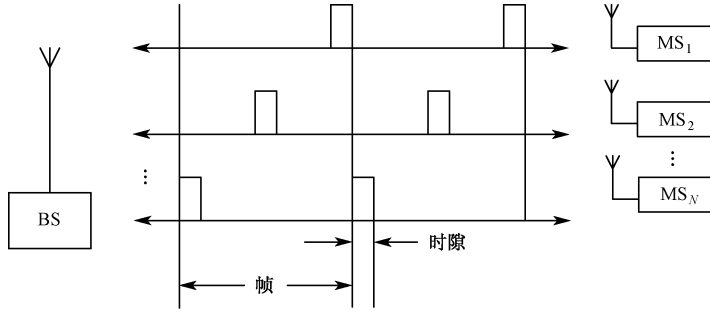


图 3-9 TDMA 系统时隙用户结构示意图

在频分双工（FDD）方式中,上、下行链路的信号分别在不同的频率上。在时分双工（TDD）方式中,上、下行帧都在相同的频率上。时分双工示意图如图 3-10 所示。

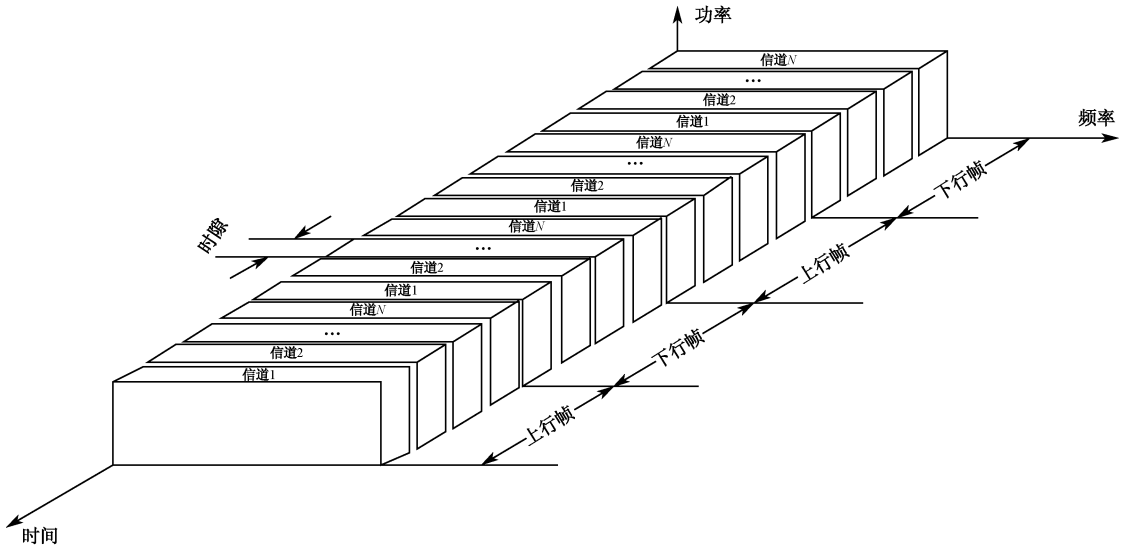


图 3-10 时分双工示意图

不同通信系统的帧长度和帧结构是不同的。典型的帧长在几毫秒到几十毫秒之间。例如, GSM 系统的帧长为 4.6ms,每帧 8 个时隙; DECT 系统的帧长为 10ms,每帧 24 个时隙; PACS 系统的帧长为 2.5ms,每帧 8 个时隙。TDMA 系统既可以采用频分双工（FDD）方式,也可以采用时分双工（TDD）方式。在 FDD 方式中,上行链路和下行链路帧结构既可以相同,也可以不同。在 TDD 方式中,通常将在某一频率上一帧中一半的时隙用于移动台发信,另一半的时隙用于移动台收信,收发工作在相同的频率上进行。

在 TDMA 系统中,设计每帧中的时隙结构通常要考虑到 3 个主要因素,即控制和信令信息的传输、信道多径的影响和系统的同步。两种典型的时隙结构如图 3-11 所示,在每个时隙中有专门划分出的部分比特用于控制和信令信息的传输。

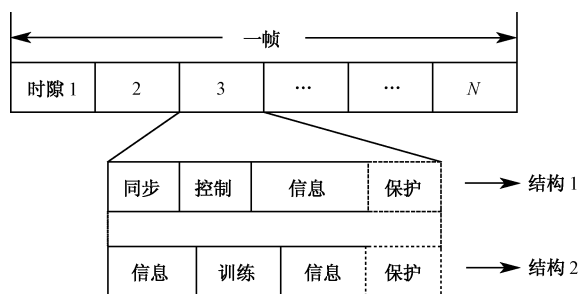


图 3-11 两种典型的时隙结构

2. TDMA 系统主要特点

TDMA 系统主要有如下特点。

(1) 同步是 TDMA 系统正常工作的前提，由于 TDMA 系统的传输速率高（远大于语音编码速率），所以 TDMA 系统的同步开销较大；为了便于接收端的同步，在每一个时隙中还要传输同步序列。

(2) 发射信号的速率随着时隙数的增加而提高，如果到达 100kbps 以上，码间串扰就会加大，必须采用自适应均衡器，用以补偿传输失真。图 3-11 中第二种帧结构的优点，就是便于接收端均衡器消除码间干扰对整个时隙的影响。这是因为在时隙中插入自适应均衡器所需要的训练序列，对于接收端来说，训练序列是明确的，接收端根据训练序列的解调结果，就可以估计出信道的冲击响应，从而准确地调节均衡器的系数。

(3) 在上行链路的每一个时隙中要留一定的保护间隔，即每个时隙中传输信号的时间要小于时隙长度。这是为了克服因移动台至基站距离的随机变化而引起的移动台发出的信号到达基站接收机时刻的随机变化，从而保证不同的移动台发出的信号在基站处都能落在规定的时隙内，而不会出现相互重叠的现象。

(4) 基站的复杂性减小，多个时分信道占用一个载波，占据相同带宽，只需要一部收发信机，互调干扰小。

(5) 抗干扰能力强，频率利用率高，系统容量大。

(6) 越区切换简单，由于 TDMA 系统中的移动台不是连续传输的，所以可利用空闲时隙监测其他基站，这样的越区切换在无信息传输时进行，因而没有必要中断传输信息，即使传输数据也不会因为越区切换而丢失。

TDMA 的呼损性能可完全采用 FDMA 中的分析方法和结论。TDMA 中的信道数为每个基站使用载波数与每个载波的时隙数的乘积。

3.2.4 码分多址（CDMA）方式

码分多址（Code Division Multiple Access, CDMA）是以扩频信号（扩频信号是一种经过伪随机序列调制的宽带信号）为基础的多址方式。

图 3-12 所示为 CDMA 的原理框图，它利用不同码型实现不同用户的信息传输。信号先由信源发出，经过简单的信道编码，再进行扩频调制。扩频调制需要先产生一系列时域上的窄脉冲与时域上的宽幅信号相乘，得到一系列的窄幅信号，这相当于在频域上将原信号拉宽，其信号通常比原始信号的带宽高几个数量级，即所谓扩频通信。扩频信号经信道传输到达接收方，再由相同扩频码进行扩频解调，最后经过信道解码即得所需数据。

1. CDMA 系统概念

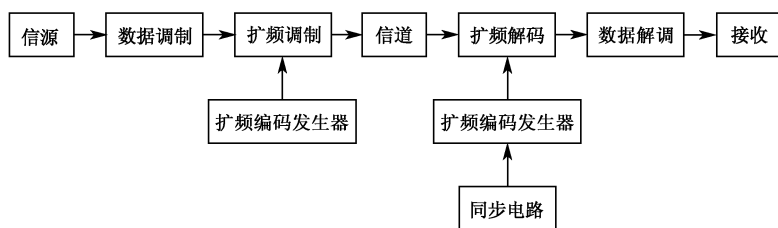


图 3-12 CDMA 的原理框图

常用的扩频信号有两类，即跳频信号和直接序列扩频信号（简称直扩信号），因而相对应的多址方式为跳频码分多址（FH-CDMA）和直扩码分多址（DS-CDMA）。与这两种多址技术对应的扩频技术是跳频扩频技术（FHSS）和直接序列扩频技术（DSSS）。

2. CDMA 系统的特点

与其他多址方式相比，CDMA 系统有如下特点。

（1）CDMA 系统是由许多用户共享同一频率，存在自身多址干扰，同时许多用户共享一个信道，会发生远近效应，必须采用功率控制的方法克服。

（2）系统容量大，CDMA 是干扰限制性系统，任何降低干扰的技术都可以直接转化为系统容量的提高。除此之外，系统还有容量软特性，比如在 TDMA 系统中，同时可接入的用户数量是固定的，不能再多接入任何一个用户，而在 DS-CDMA 系统中多增加一个用户只会使通信质量略有下降，不会产生硬堵塞现象。

（3）在 CDMA 系统中，信道数据速率很高，由于 PN 序列的自相关性，所以时延扩展部分在接收机中得到了自然的抑制。且由于信号被扩展在一个较宽的频谱上，容易获得最佳的抗多径衰落效果。而在 TDMA 系统中，为了克服多径效应造成的码间干扰，需要用复杂的自适应均衡。

（4）CDMA 系统可实现平滑的越区切换。DS-CDMA 系统中所有小区使用相同的频率，这不仅简化了频率规划，也使越区切换得以完成。每当移动台处于小区边缘时，同时有两个或两个以上的基站向该移动台发射相同信号，接收机可以同时接收并合并这些信号，当某一基站的信号强于当前基站信号且稳定时，移动台才进行切换。

3.2.5 空分多址（SDMA）方式

除了上述常用的多址方式外，空分多址也是一种可用的多址方法。空分多址（Space Division Multiple Access, SDMA）通过空间的分割来区分不同的用户。在移动通信系统中，能实现空间分割的基本技术就是采用自适应阵列天线，在不同的用户方向上形成不同的波束，如图 3-13 所示。

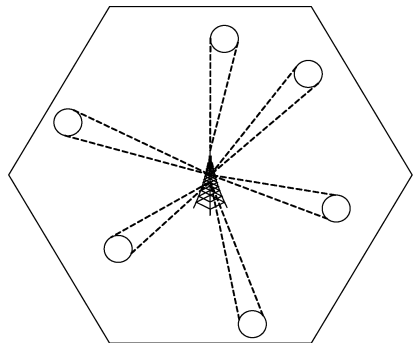


图 3-13 SDMA 工作示意图

不同波束可采用相同的频率，也可以采用不同的频率。在极限情况下，自适应阵列天线具有极小的波束和无限快的跟踪速度，可以实现最佳的 SDMA。此时，在每个小区内，每个波束可以提供一对无其他用户干扰的唯一信道。采用窄波束天线可有效地克服多径干扰和通道干扰。上述理想状态需要无限多个天线阵元，但在实际应用中是不可能实现的。在现实条件

下,采用适当数目的阵元,也可以获得较大的系统增益。

3.3

区域覆盖和频率分配

移动通信网的区域覆盖方式分为两类:一是小容量的大区制,另一类是大容量的小区制。

3.3.1 区域覆盖

为了提高移动通信系统容量,需要采用多个基站来覆盖服务区,每个基站覆盖的区称为一个小区。如果每个小区都分配不同的频谱,那么将需要大量频谱,对于宝贵的频谱资源是一种浪费。为了提高频谱的利用率,需要将相同的频谱在相隔一定距离的小区中重复使用,只要保证使用相同频率的小区之间干扰足够小即可。

1. 服务区覆盖方式

小区制移动通信系统的频率复用和覆盖方式有两种,一种是带状服务覆盖区,另一种是面状服务覆盖区。

1) 带状服务覆盖区

带状网主要用于覆盖公路、铁路、海岸等,为了克服同频干扰,通常采用如图 3-14 (a) 所示的双频率组配置和图 3-14 (b) 所示的三频率组配置。如果基站天线采用定向辐射,覆盖区形状是如图 3-14 (a) 所示的扁圆形的;如果采用全向天线,则覆盖区是如图 3-14 (b) 所示的圆形结构的。

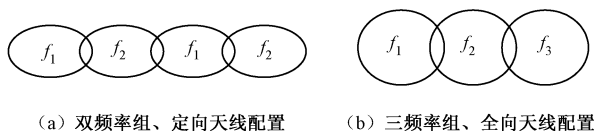


图 3-14 带状网服务区

2) 面状服务覆盖区

在带状小区中,小区呈线性排列,区群的组成和同频道小区距离的计算都比较方便。而在平面内划分小区,通常组成蜂窝式网络,就是一个比较复杂的问题了。当考虑到要覆盖整个区域且没有重叠间隙的几何形状时,只有正三角形、正方形和正六边形。经计算可知,在天线辐射半径相同的情况下,正六边形的覆盖面积最大,交叠区的面积最小,是最理想的几何图形。同样用正六边形覆盖整个服务区所需要的基站数最少,最经济。正六边形构成的网络如同蜂窝,因此将小区形状为正六边形的小区制移动网络称为蜂窝网,如图 3-15 所示。

为了保证同信道小区之间有足够的距离,附近的若干小区都不能使用相同的频率信道。这些不同信道的小区就组成了一个区群,只有不同区群的小区才能进行频率复用。区群必须满足相邻区群之间可以无缝隙无重叠地覆盖,且相邻同信道小区之间的距离相等。满足上述条件的区群形状和区群内的小区数不是任意的,通过证明,区群内的小区数应满足

$$N = i^2 + ij + j^2 \quad (3-12)$$

式中, i 、 j 为正整数。为了找到某一特定小区相距的同频相邻小区,可以用下面的方法来确定,图 3-15 中 $i=3$, $j=2$, 自某个小区 A 出发,沿着边的垂直方向移动 j 个小区,逆时针旋转 60°

再移动 i 个小区, 这样就到达了同频小区。设小区半径为 R , 则从图 3-15 可以算出同信道小区之间的距离为

$$\begin{aligned} D &= \sqrt{3}R\sqrt{(j+i/2)^2 + (\sqrt{3}i/2)^2} \\ &= \sqrt{3(i^2 + ij + j^2)} \cdot R = \sqrt{3N} \cdot R \end{aligned} \quad (3-13)$$

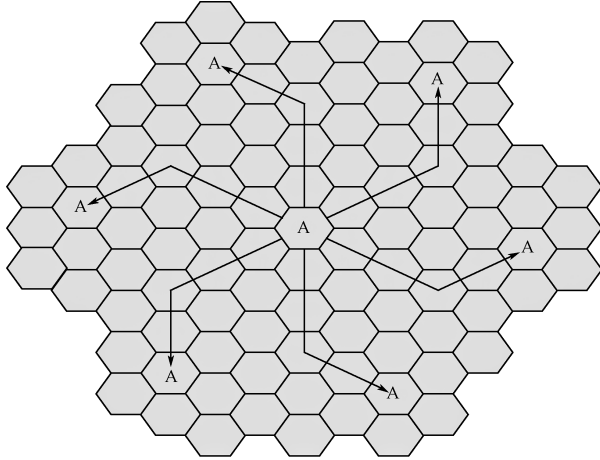


图 3-15 同信道小区的定位方法

2. 小区激励与小区分裂

区群内小区数越多, 同信道小区距离就越远, 抗同频干扰性能就越好。用六边形覆盖服务区时, 基站发射机或安放在小区中心(中心激励小区), 或安放在六边形 6 个顶点中的 3 个(顶点激励小区)。

在整个服务区内, 每个小区的大小可以是相同的, 这只能适应用户密度均匀的情况。而实际上用户的分布是不均匀的, 比如城市中心区的用户密度高, 郊区的用户密度低。为了适应这种情况, 在用户密度大的地方用面积小的小区, 用户稀疏的地方用面积大的小区。另外, 随着城市建设的发展, 原先人口稀疏的地方有可能会变成高密度的用户区, 这就需要重新添加基站, 将小区面积划小, 这种方法叫做小区分裂, 如图 3-16 所示。

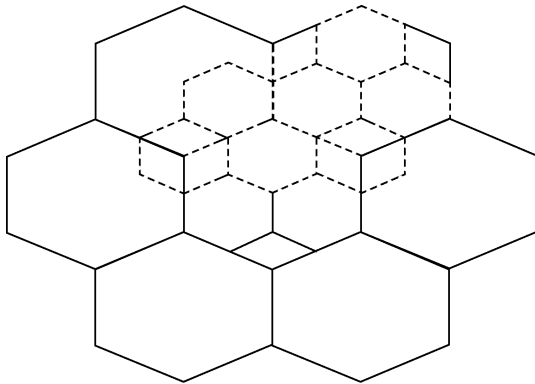


图 3-16 小区分裂示意图

3.3.2 频率分配

频率分配是指如何将给定频率分配给一个区群的各个小区, 它主要是针对 FDMA 和 TDMA

的, 因在 CDMA 系统中所有用户使用相同的工作频率, 所以不需要进行频率分配。频率分配的方法主要有分区分组配置法和等频距配置法。

1. 分区分组配置法

使用分区分组配置法的原则是应尽量减少占用的总频段, 以提高频段的利用率。同一小区内不能使用相同的信道, 以避免同频干扰。小区内采用无三阶互调的相容信道组, 以避免互调干扰。避免互调干扰是分区分组配置法的主要出发点, 但并未考虑同一信道组中频率间隔, 可能会出现较大的邻频干扰。

2. 等频距配置法

等频距配置法是按照等频率间隔来配置信道的, 只要频距选得足够大, 就可以有效地避免邻道干扰。这样的频率配置, 正好能满足产生互调的频率关系, 不过正是因为频距大, 接收机的滤波器可以比较轻松地滤除互调干扰。例如, 一个信道间隔为 25kHz, 规定同一信道组内的信道最小间隔为 7 个信道, 则该信道最小频率间隔为 175kHz, 这样接收机输入滤波器便可以有效地抑制邻道干扰和互调干扰。

3. 频率复用技术

频率复用主要用于解决频率资源限制的问题, 并能大幅度提高系统的容量。实际上, 蜂窝小区和频率复用都是蜂窝组网的概念。蜂窝系统的基站工作频率, 由于传播损耗提供足够的隔离度, 在相隔一定距离的另一个基站可以重复使用同一组工作频率, 称为频率复用。

在一个蜂窝系统中, 每个蜂窝都有一个基站收发器。为了既允许用一个给定的频率在蜂窝区内通信, 同时又限制该发射功率, 以避免其从蜂窝区透射到邻接的蜂窝区, 所以发射功率被小心地控制着。然而, 在两个相邻的蜂窝区内试图使用同一频率是不可以的, 但是在彼此相邻一些距离的蜂窝区中可使用相同的频率, 这样可以在不同的蜂窝区中允许多个并发的通话都使用相同的频率。在一个给定的蜂窝区中可以分配多个频率, 每个蜂窝区分配的频率数目依赖于其所预计的通信量。采用频率复用大大缓解了频谱资源紧张和用户数量日益增长的矛盾。频率复用技术能够从有限的原始频率分配产生几乎无限的可用频率。图 3-17 所示为 $N=7$ 的频率复用模型。

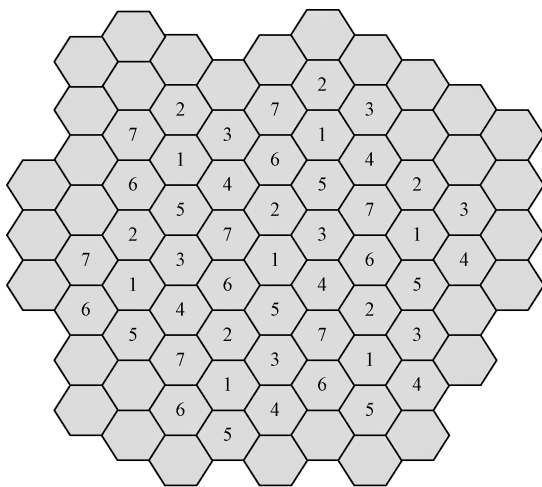


图 3-17 $N=7$ 的频率复用模型

在移动通信网中,为了使全网有秩序地工作,除了要传输用户信息之外,还要在正常通话的前后和过程中传输很多其他控制信号,如电话网中必不可少的摘机、挂机、空闲音、忙音、拨号、振铃、回铃,以及无线通信网中所需要的频道分配、用户登记与管理、呼叫与应答、越区切换和发射机功率信号控制等。这些和通信相关的一系列控制信号统称为信令。

信令是这样一个系统,它允许程控交换、网络数据库、网络中其他的智能节点交换呼叫建立、监控、拆除、网络管理等相关信息。其作用是保证用户信息有效且可靠地传输。因此,可认为信令是整个通信网络的神经中枢,其性能在很大程度上决定了一个通信网络为用户提供服务的能力和质量。

信令分为两种:一种是用户到网络节点间的信令(称为接入信令);另一种是网络节点之间的信令(称为网络信令)。常见的信令包括 ISDN 网中的 1 号数字用户信令系统,还有移动通信中的网络信令的 7 号信令系统。

1. 接入信令

接入信令是移动台到基站之间的信令。物理信道中传输信令的方式依照空中接口标准的不同有多种形式。有的设有专门控制信道,主要适用于大容量的公用通信网;有的不设专用的控制信道,由语音信道进行传输,适用于小容量的专用通信网络。在通信过程中需要对信号状态进行检测,以便进行功率控制、越区切换等。所以即使是设置了专用的控制信道,有的信令也必须由语音信道传输,这些信令称为随路信令。

按信号形式不同,信令又可分为数字信令和音频信令。数字信令具有速度快、容量大、可靠性高的优势,已经成为目前公用移动通信网中采用的主要形式。

1) 数字信令

移动通信网容量的扩大及微电子技术的发展,促进了数字信令的发展。数字信令具有传输速度快,组码数量大,电路便于集成化,可以促进设备小型化,降低成本等优点,因此有逐步取代模拟音频信令的趋势。特别是在大容量的移动通信网中,目前已广泛使用了数字信令。在移动信道中传输数字信令,除了需要窄带调制和同步之外,还需要解决可靠传输的问题。因为在信道中遇到干扰后,数字信号会发生错码,必须采用各种差错控制技术,才能保证可靠传输,如检错、纠错等。

在传输数字信令时,为了便于接收端解码,要求数字按一定格式编排。不同的移动通信网,其信令格式各具特色。常用的数字信令格式如图 3-18 所示。图中的前置码(P)提供位同步信息,用来确定每一码位的起始和终止时刻,以便接收端进行积分和判决。为便于提取位同步信息,前置码一般采用 1010……的交替码。接收端用锁相环路即可提取同步信息。字同步码(SW)用于确定信息(报文)的开始位,相当于时分制多路通信中的帧同步。在接收时,可以在数字信号序列中识别出字同步的码组位置来实现同步。最常用的是著名的巴克码。地址或数据码同步(A或D)通常包括控制、选呼、拨号等信令,各种系统都有其独特的规定。纠错码(SP)也称为监督码。不同的纠错编码有不同的检错和纠错能力。一般来说,监督位码元所占的比例越大,检错、纠错的能力就越强,但编码效率就越低。纠错编码是以降低信息传输速率为代价

来提高传输可靠性的。移动通信中常用的纠错码是奇偶校验码、汉明码、BCH 码和卷积码等。

P	SW	A 或 D	SP
---	----	-------	----

图 3-18 常用的数字信令格式

在数字蜂窝系统中，均有严格的帧结构。例如，在 TDMA 系统的帧结构中，通常都有专门的时隙用于信令传输，或在每个时隙中设有专门的比特域用于信令传输。

2) 音频信令

音频信令是由不同的音频信号组成的。目前常用的有带内音频信令、双音频信令和多音频信令 3 种。

用 0.3~3kHz 范围内不同的单音作为信令的方法称为带内单音信令(低于 300Hz 的单音做信令称为带外亚音信令)。例如，单频码 (SFD) 由 10 个带内单音组成，如表 3-3 所示。

表 3-3 单频码 SFD

F_1	1 124Hz	F_6	1 540Hz
F_2	1 200Hz	F_7	1 640Hz
F_3	1 275Hz	F_8	1 745Hz
F_4	1 355Hz	F_9	1 860Hz
F_5	1 446Hz	F_{10}	2 110Hz

表中 $F_1\sim F_8$ 用于选呼。基站发 F_9 表示信道忙，发 F_{10} 表示信道空闲。反过来，移动台发 F_{10} 表示信道忙，发 F_9 表示信道空闲。拨号信号为由 F_9 和 F_{10} 组成的 FSK 信号。

单音信令系统要求发送端有多个不同频率的振荡器，接收端有相应的选择性极好的滤波器，通常都用音叉振荡器和滤波器。这种信令的优点是抗衰落性能好，但每一单音必须持续 200ms 左右，处理速度慢。

拨号信令是移动台主叫时发向基站的信号，应当考虑兼容市话设备，并且适用于在无线信道中传输，常用的方式有单音频脉冲、双音频脉冲、10 中取 1、5 中取 2 及 4×3 方式。其中 4×3 方式就是市话网用户环路中用的双音多频 (DTMF) 方式，也是我国国家标准中推荐的用户多频信令。这种信令在与地面自动电话网衔接时不需要译码转换，因此在自动拨号的移动通信网中被普遍采用。它使用语音带内的 7 个单音，将它们分为高音群和低音群。每次发送时用高音群的一个单音和低音群的一个单音来代表一个十进制数。其优点是每次发送的两个单音中，一个取自高音群，一个取自低音群，二者频差大，易于检出；与市话兼容，不需转换，传送速度快；设备简单，性能可靠，成本低。

3) 信令传输协议

在数字蜂窝移动通信系统中，空中接口的信令分为 3 层，如图 3-19 所示。为了传输信令，物理层在物理信道上形成了许多逻辑信道，如广播信道 (BCH)、随机接入信道 (RACH)、接入允许信道 (AGCH) 和寻呼信道 (PCH) 等，这些逻辑信道按照一定规则复接在物理层，在这些逻辑信道上传输链路层的信息。

链路层信息帧的基本格式包括地址段、控制字段、长度指示段、信息段和填充段。不同的信令可对这些字段进行取舍，控制字段定义了帧的类型、命令或响应。在 GSM 系统中，链路层采用的是 LAPDm 协议。它的控制字 (共 8 比特) 如表 3-4 所示。表中给出了帧的类型、用

途（命令或响应）及其基本含义。第三层的信息帧分为 I 帧、S 帧、U 帧 3 类。表 3-4 中的 N（R）是接收机接收序号，N（S）是发信机发送序号。S 是监督功能比特，U 是无编号功能比特。P/F 是查询/终止比特，发送命令帧时为查询比特，发送响应帧时为终止比特。

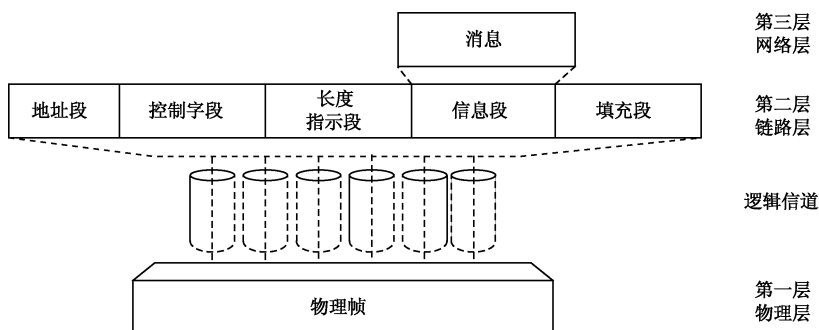


图 3-19 帧传输格式

表 3-4 控制字构成

类 型	命 令	响 应	8 7 6	5	4 3 2 1	备 注
I 帧（信息传送）	I（信息）		N（R）	P	N（S） 0	信息帧
S 帧（监督）	RR	RR	N（R）	P/F	0001	接收准备好
	RNR	RNR	N（R）	P/F	0101	接收未准备好
	REJ		N（R）	P/F	1001	拒绝
U 帧（无编号）	SABM		001	P	1101	置异步平衡模式
		DM	000	F	1111	非连接模式
	UI		000	P	0011	无编号帧信息
	DISC		010	P	0011	拆除逻辑链路
		UA	011	F	0011	无编号应答帧

信令的传输分为无证实（无应答）信息传输方式和有证实（应答）传输两种方式。采用无证实信息传输方式时，仅适用 UI 帧，传输协议十分简单。该帧仅传输一次，如果传输正确，则将向第三层传送；如果传输错误，将被物理层丢弃（因为 GSM 的逻辑信道提供了检错能力，链路层不再检错）。采用有证实信息传输方式时，帧的交换信息过程分为连接建立、数据传输和拆线 3 个阶段。

在连接建立阶段，主叫方（发起通信方）利用“SABM”发出建立逻辑链接的请求，如果对方同意，则回送响应帧 UA，这时逻辑链路已经建立，双方可进行数据传输。在数据传输阶段，任何一方都可以开始用 I 帧传输数据，发送端对 I 帧进行编号 0~7。在帧控制字中的 N（S）表示当前发送帧的序号。接收端可以在反向传输信息帧中，用附带的方法进行应答，即在控制域中用 N（R）表示已正确收到对方的第 N（R）-1 帧，目前希望接收第 N（R）帧。接收端可以用 RR 帧和 RNR 帧予以应答，也可以用 REJ 通知对方第 N（R）帧有错，要求重发。传输结束后进入拆线阶段，任一方均可发出拆线请求帧 DISC，如果对方同意，则发回 UA 帧。至此，帧的交换过程结束。

2. 网络信令

常用的网络信令是 7 号信令，其协议结构如图 3-20 所示，主要用于交换机与交换机之间、交换机与数据库之间的信息交换。

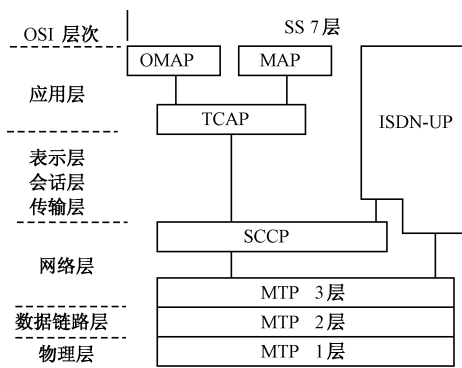


图 3-20 7 号信令系统的协议结构

7 号信令系统的协议结构包括 MTP、SCCP、TCAP、MAP、OMAP 和 ISDN-UP 等部分。MTP 为消息传递部分，它提供一个无连接的消息系统。它可以使信令信息跨越网络到达目的地。MTP 中的功能是允许在网络中发生的系统故障不对信令信息传输产生不利影响。由图 3-20 可以看出，MTP 分为 3 层，第一层为信令数据物理层，它定义了信号链路的物理和电气特性；第二层是信令数据链路层，它提供数据链路的控制，负责提供信令数据的可靠传输；第三层是信令网络层，它负责提供公共消息的传送功能。

SCCP 是信令连接部分，用于面向连接和无连接业务所需要的对 MTP 的附加功能。SCCP 提供地址扩展能力和 4 类业务，这 4 类业务是：0 类是基本的无连接型业务，1 类是有序的无连接型业务，2 类是基本的面向连接型业务，3 类是具有流量控制的面向连接型业务。ISDN 用户部分支持的业务包括基本的承载业务和许多 ISDN 补充业务。ISDN-UP 既可以使用 MTP 业务来进行交换机之间可靠、按顺序的信令消息传输，也可以使用 SCCP 业务做点对点信令方式。ISDN-UP 的基本承载业务就是建立、监视和拆除收发端交换机之间的电路连接。

TCAP 是事务处理能力应用部分，它提供与电路无关的信令应用之间交换信息的能力，TCAP 提供操作、维护和管理部分（OMAP）和移动应用部分（MAP）应用等。在 MAP 中实现的信令协议有 IS-41、GSM 应用等。

7 号信令的网络结构如图 3-21 所示。7 号信令网络是与 PSTN 平行的一个独立网络。它由信令点（SP）、信令链路和信令转移点（STP）3 个部分组成。信令点是发送信令和接收信令的设备，包括业务交换点（SSP）和业务控制点（SCP）。

SSP 是电话交换机，它们由 7 号信令链路互连，完成在交换机上发起、转移或到达的呼叫处理。在移动网中，SSP 称为移动交换中心（MSC）。

SCP 包括提供增强型业务的数据库，SCP 接收 SSP 的查询，并返回所需的信息给 SSP。在移动通信网中，SCP 包括一个原籍位置寄存器（HLR）或一个访问位置寄存器（VLR）。

STP 是在网络交换机和数据库之间中转 SS7 消息的交换机。STP 根据 7 号信令消息的地址域，将消息送到正确的输出链路上。为了满足苛刻的可靠性要求，STP 都是成对出现的。在 7 号信令网中，共有 6 种类型的信令链路，图 3-21 中给出的是 A 链路（Access Link）和 D 链路（Diagonal Link）。

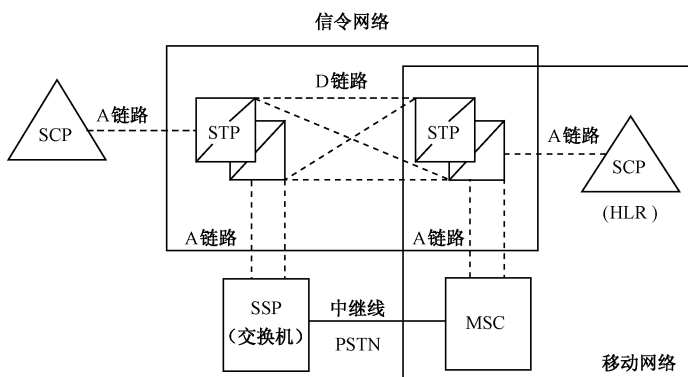


图 3-21 7 号信令的网络结构

3. 信令的作用及呼叫过程实例

信令网络和电话交换网络组成的示意图如图 3-22 所示，以固定用户呼叫移动用户为例，说明信令的作用和工作过程。电话交换网络由 3 个交换机（端局交换机、汇接局交换机和移动交换机）、两个终端（电话终端、移动台）及中继线（交换机之间的链路）、ISDN 线路（固定电话机与端局交换机之间的链路）和无线接入链路（MSC 至移动台之间的等效链路）组成。固定电话机到端局交换机采用接入信令，交换机之间采用网络信令（7 号信令），移动链路也采用接入信令。

假设固定电话用户呼叫移动用户。用户摘机拨号后，固定电话机发出建立（SETUP）消息请求建立连接，端局交换机根据收到被叫移动台的号码，确定出移动台的临时本地号码（TLDN）。在得知移动电话的 TLDN 后，端局交换机通过信令链路（按照图示①→②→③→④→⑤的顺序）向 MSC 发送初始地址消息（IAM），进行中继链路的建立，并向固定电话机回送呼叫处理消息，指示呼叫正在处理。IAM 到达 MSC 后，MSC 寻呼移动用户。寻呼成功后，向移动台发送建立（SETUP）消息。如果该移动用户是空闲的，则向 MSC 发送警示（ALERTING）消息，接着向移动台振铃。通过信令链路（按照图示⑤→④→③→②→①的顺序）向端局交换机发送地址完成消息（ACM）。该消息表明 MSC 已收到完成该呼叫所需的路由信息，并把有关该移动用户的信息、收费指示、端到端协议要求通知端局交换机。ACM 到达端局交换机后，该交换机向固定电话端发送警示消息，固定电话机向用户送回铃音。

当移动用户摘机应答这次呼叫时，移动台向 MSC 发送连接消息，将无线业务信道接通，MSC 收到后，发给端局交换机一个应答消息（ANM），指示呼叫已经应答，并将选定的中继线⑥和⑦接通。ANM 到达后，端局交换机向固定电话机发送连接消息，将选定的 B 信道接通。至此，固话用户通过 B 信道、中继线路⑥和⑦，以及无线业务信道和移动用户进行通话。通话结束后，假定固定电话用户先挂机，它向网络发出拆线消息，请求拆除链路，端局交换机通过信令链路发送释放消息（REL），指明使用的中继线将要从中释放出来。MSC 收到 REL 消息后，向移动用户发出拆线消息，移动台拆除业务信道后，向 MSC 发送 REL 消息，MSC 以释放完成 RLC（RELEASE COMPLETE）消息应答。

汇接局交换机和 MSC 收到 REL 后，以释放完成消息（RLC）进行应答，以确信指定的中继线已在空闲状态。端局交换机和汇接交换机收到 RLC 之后，将指定的中继线置为空闲状态。端局交换机拆除连接后向固定电话机发出 REL 消息，固定电话机以 RLC 消息应答。

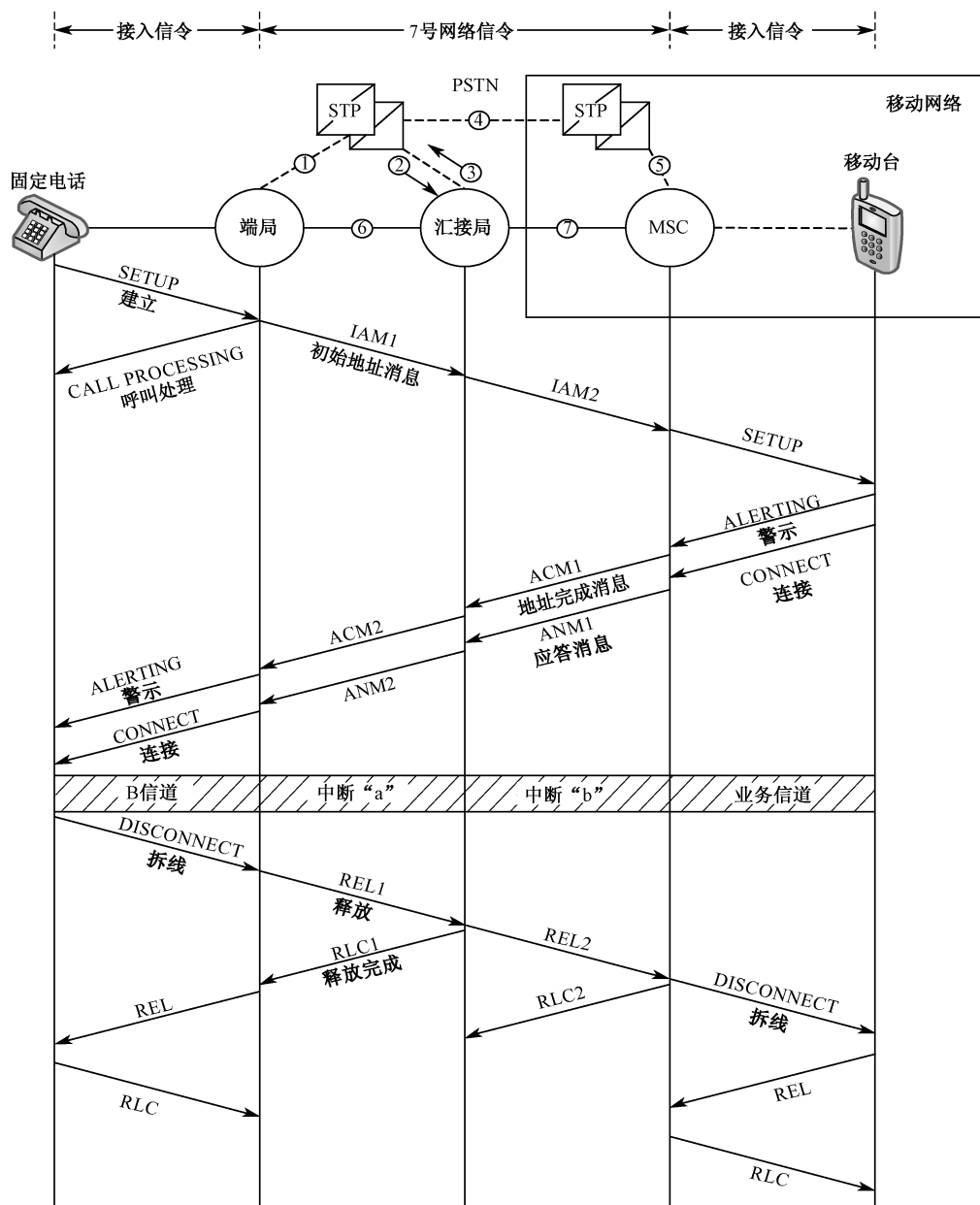


图 3-22 呼叫控制的信令应用

3.5

移动通信网络结构

移动通信网络是移动台之间、移动台和固定用户之间，以及固定用户和移动台之间能够建立多信息传输通道的通信系统。移动网络从第二代仅支持语音业务和低速的网络架构，已经发展到了第三代支持高速数据业务、多媒体业务等的网络架构。

1. 移动网基本结构

典型的蜂窝移动系统组成示意图如图 3-23 所示。移动通信无线服务区由许多正六边形的小区覆盖而成，通过接口与公共通信网（PSTN、PSDN）互连。移动通信系统通常包括移动交换子系统（SS）、操作维护管理子系统（OMS）和基站子系统（BSS）（通常包括移动台），是一个完整的信息传输实体。

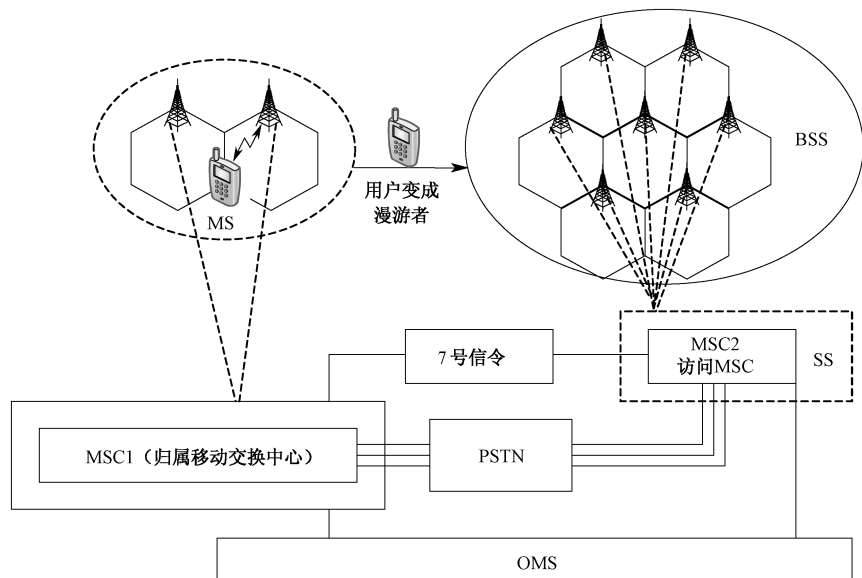


图 3-23 典型的蜂窝移动系统组成示意图

移动通信中建立一个呼叫是由基站子系统和移动交换子系统共同完成的。BSS 提供并管理移动台和 SS 之间的无线传输通道，SS 负责呼叫控制功能，所有的呼叫都是经由 SS 建立连接的。操作维护管理子系统负责管理控制整个移动网。

移动通信网中使用的交换机通常被称为移动交换中心（MSC）。它与常规交换机的不同之处是：MSC 除了要完成常规交换机的所有功能外，还负责移动性管理和无线资源管理，包括越区切换、漫游、用户位置登记等。

在蜂窝移动网中，为了便于网络组织，将一个移动通信网分成若干个服务区，每个服务区又分为若干个 MSC 区，每个 MSC 区又分为若干个位置区，每个位置区再由几个基站小区组成。一个移动通信网由多少服务区或多少 MSC 区组成，取决于移动通信网所覆盖地域的用户密度和地形地貌等。

数字移动通信系统是为适应高速数据业务的需求而发展起来的。与模拟蜂窝移动系统不同的是，数字移动通信系统将移动性管理、用户鉴权和认证从 MSC 中分离出来，设置原籍位置寄存器（HLR）（又称归属地位置寄存器）和访问位置寄存器（VLR）来进行管理。

数字蜂窝通信系统网络结构示意图如图 3-24 所示，每个移动用户必须在 HLR 中注册。HLR 中存储着两类用户信息：一类是有关用户的参数信息，如用户类别，向用户提供的服务，用户的各种号码、识别码及保密参数等；另一类是用户的当前位置信息，如 VLR 地址、移动台漫游号码等，以及建立至移动台的呼叫路由。

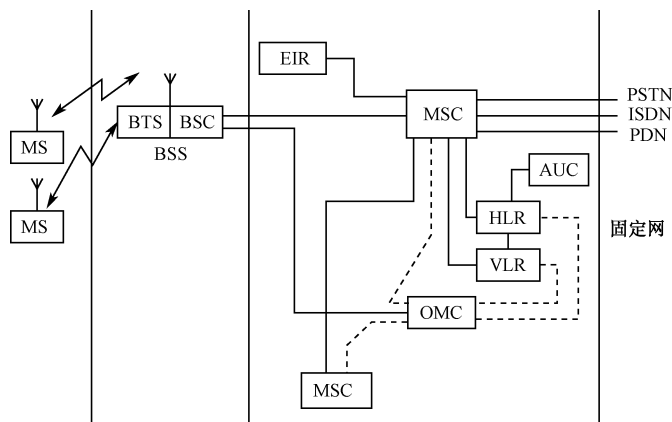


图 3-24 数字蜂窝通信系统网络结构示意图

访问位置寄存器（VLR）是存储用户位置信息的动态数据库。当漫游用户进入某个 MSC 区域时，必须向与该 MSC 相关的 VLR 登记，被分配一个移动用户漫游号（MSRN），在 VLR 中建立该用户的相关信息，其中包括移动用户识别码（MSI）、移动台漫游号（MSRN）、所在位置的标志及向用户提供的服务等参数，而这些信息是从相应的 HLR 中传递出来的。MSC 是无线电系统与公共电话交换网之间的接口设备，要完成必需的信令功能，建立与移动台的往来呼叫。MSC 将具体完成如下任务：路由选择管理，计费和费率管理，业务量管理，向 HLR 发送有关的业务量信息和计费信息。MSC 处理入网和出网呼叫时需要查询 VLR 中相关信息。一个 VLR 可以负责一个或几个 MSC 区域。网络中设置认证中心（AUC）进行用户鉴权和认证。认证中心是认证移动用户的身份及产生相应认证参数的功能实体，这些参数包括随机号码 RAND、期望响应 SRES（Sign Response）和密钥（KC）等。认证中心对任何试图入网的用户进行身份认证，只有合法用户才能接入网中并得到服务。

在构成实际网络时，根据网络的规模、所在地域及一些其他因素，上述功能实体可有各种配置方式。通常 MSC 和 VLR 被设计在一起，而 HLR、设备标识寄存器（EIR）和 AUC 被设置于另一个物理实体中。在某些情况下，MSC、VLR、HLR、AUC 和 EIR 也可以被设置在一个物理实体中。

2. 接口功能

为了便于各种设备之间的互连互通，ITU 组织定义了公共陆地移动通信网的结构、功能和接口，如图 3-25 所示，各个接口的主要功能为：

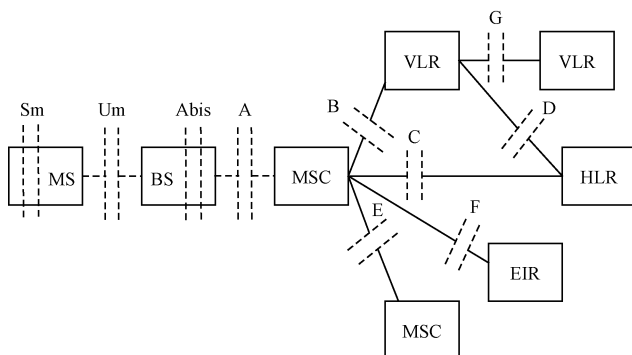


图 3-25 蜂窝系统所用的接口

(1) 人机接口 (Sm)。它是用户与移动网络之间的接口, 在移动设备中包括键盘、液晶显示器及实现用户身份识别功能的部件。

(2) 移动台与基站之间的接口 (Um)。它是移动台和基站收发信机之间的无线接口, 是移动通信网的主要接口。它包含信令接口和物理接口两方面的含义。无线接口的不同是数字移动网与模拟移动网的主要区别之一, 也就是说, 它们选用的无线接口标准不同。

(3) 基站控制器 (BSC) 与基站收发信台 (BTS) 之间的接口 (Abis)。基站系统 (BSS) 包括 BSC 和 BTS 两部分, 它们之间的接口 Abis 支持所有向用户提供的服务, 并支持对 BTS 无线设备的控制和对无线资源的分配。

(4) 基站与移动交换中心之间的接口 (A 接口)。A 接口是网络中的重要接口, 因为它连接着基站和移动交换中心两个系统的重要组成部分。此接口所传递的信息主要有基站管理、呼叫处理与移动特性管理等。

(5) 移动交换中心 (MSC) 与访问位置寄存器 (VLR) 之间的接口 (B 接口)。VLR 是移动台在相应 MSC 控制区域内进行漫游时的定位和管理数据库。每当 MSC 需要知道某个移动台的当前位置时, 就要查询 VLR。当移动台启动与某个 MSC 有关的位置更新程序时, MSC 就会通知 VLR 存储有关信息。

(6) 移动交换中心 (MSC) 与归属地位置寄存器 (HLR) 之间的接口 (C 接口)。C 接口用于传递管理与路由选择的信息。呼叫结束时, 相应的 MSC 会向 HLR 发送计费信息。当固定网不能查询 HLR 中需要的位置信息来建立某个移动用户呼叫时, 有关的 GMSC (网关 MSC) 就应查询此用户归属的 HLR, 以获得被叫移动台的漫游号码, 并传递给固定网。

(7) 归属地位置寄存器 (HLR) 与访问位置寄存器 (VLR) 之间的接口 (D 接口)。D 接口用于移动台位置和用户管理的信息交换。为支持移动用户在整个服务区内发起或接收呼叫, 两个寄存器间必须进行数据交换。VLR 通知 HLR 某个归属它的移动台的当前位置, 并提供该移动台的漫游号码; HLR 向 VLR 发送支持对该移动台服务所需要的所有数据。当移动台漫游到另一个 VLR 服务区时, HLR 应通知原先为此移动台服务的 VLR 消除有关信息。当移动台使用附加业务或者用户要求改变参数时, 也要使用 D 接口。

(8) 移动交换中心之间接口 (E 接口)。E 接口主要用于 MSC 之间交换有关越区切换的信息。当移动台在通话过程中从一个 MSC 服务区移至另一个 MSC 服务区时, 为维持连续通话, 就要进行越区切换。此时, 在相应 MSC 之间通过 E 接口交换在切换过程中所需要的信息。

(9) 移动交换中心 (MSC) 与设备标志寄存器 (EIR) 之间的接口 (F 接口)。F 接口用于在 MSC 与 EIR 之间交换有关移动设备管理的信息, 如国际移动设备识别码等。

(10) 访问位置寄存器 VLR 之间的接口 (G 接口)。当某个移动台使用临时移动台标识号 (TMSI) 在新的 VLR 中登记时, G 接口用于在 VLR 之间交换信息。此接口还用于向分配 TMSI 的 VLR 检索此用户的国际移动用户识别码 (IMSI)。

移动通信网的网络结构是随着技术的发展不断改进的。在模拟移动通信网中, 没有专门的智能节点; 在第二代数字移动通信网中引入了 HLR、VLR 等智能节点; 目前移动通信网已经发展到第三代支持高速数据业务、多媒体业务等的网络架构。

3.6 越区切换与位置管理

越区切换是指当前正在进行的移动台与基站之间的通信链路从当前基站移动到另一个基站的过程。

3.6.1 越区切换

通常发生在移动台从一个基站覆盖的小区进入到另一个基站覆盖的小区时，为了保持通信的连续性，将移动台与当前基站之间的链路转移到移动台与新基站之间的链路。还有一种情况是某小区业务信道容量几乎全被占用，这时移动台被切换到业务信道比较闲的相邻小区。在移动台进行越区切换的过程中，人们所关心的主要性能指标包括越区切换的失败率、因越区失败而使通信中断的概率、越区切换的速率、由越区切换引起的通话中断时间间隔及越区切换发生的时延等。

1. 越区切换的原则

在决定何时需要进行越区切换时，通常根据移动台处接收的平均信号强度来确定，也可以根据移动台处的信噪比、误帧率等参数来确定。

假设移动台从基站甲移到基站乙，其信号强度的变化如图 3-26 所示。决定何时要进行越区切换的准则如下。

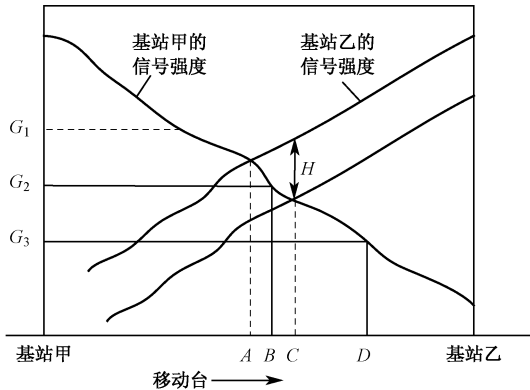


图 3-26 越区切换示意图的基站

准则 1：相对信号强度准则。在任何时间都选择具有最强接收信号，在如图 3-26 中所示的 A 处将要发生越区切换。准则 1 的缺点是在原基站的信号强度仍满足要求的情况下，会引起太多不必要的越区切换，非常容易导致移动台在两个基站之间来回切换，这就是乒乓效应。

准则 2：带阈值的相对信号强度准则。在前基站信号足够弱以至于低于预设阈值，而另一个基站比本基站信号强度强的情况下才进行切换。如图 3-26 所示，在阈值为 G_2 时，将在 B 点发生切换。使用这个准则时只要当前基站信号足够强，就不需要进行切换。该方法中的阈值选择很重要，如果阈值设定得太高，则和准则 1 没有区别。

准则 3：滞后的相对信号强度准则。只有新基站与当前基站相比信号强得多，有一个滞后的差值 H ，才发生越区切换，如图 3-26 中的 C 点。该越区切换模式阻止了乒乓效应。因为一

且发生越区切换, 差值 H 起反作用。可以认为在该准则下越区切换机制有两个状态: 尽管移动台分配给基站甲, 当基站乙相对基站甲的信号强度达到或超过 H 时, 该机制就会发生一次越区切换; 一旦移动台被分配给基站乙, 它将一直保持到相对信号强度低于 H , 移动台才会在该点返回基站甲。准则 3 的唯一缺点是如果基站甲仍有足够的信号强度, 第一次切换是没有必要的。

准则 4: 带阈值和滞后的相对信号强度准则。只有当前基站的信号强度低于规定的阈值, 新基站的信号强度比当前基站强一个滞后差值 H 时才发生越区切换, 如图 3-26 中的 D 点。

2. 越区切换的分类

根据移动台与原基站及目标基站连接方式的不同, 可以将越区切换分为硬切换和软切换两大类。

硬切换 (Hard Handoff, HHO) 是指在新的通信链路建立之前, 先中断旧的通信链路的切换方式, 即先断后通。

软切换 (Soft Handoff, SHO) 是指需要进行越区切换时, 移动台先与目标基站建立通信链路, 再切断与原基站之间的通信链路的切换方式, 即先通后断。软切换只有在使用相同频率的小区之间才能进行, 因此在模拟系统和 TDMA 系统中均不具备进行软切换的条件。

3. 越区切换的控制策略

越区切换控制包括两个方面: 一方面是越区切换的参数控制, 另一方面是越区切换的过程控制。在移动通信系统中, 过程控制的方式主要有 3 种。

(1) 移动台控制的越区切换。在该方式中, 移动台连续监测当前基站和几个越区时的候选基站的信号强度和质量。在满足某种越区切换准则后, 移动台选择具有可用业务信道的最佳候选基站, 并发送越区请求。

(2) 网络控制的越区切换。在该方式中, 基站监测来自移动台的信号强度和质量, 在信号低于某个门限值后, 网络开始安排向另一个基站的越区切换。网络要求移动台周围的所有基站都监测该移动台的信号, 并把测量结果报告给网络。网络从这些基站中选择一个基站作为越区切换的新基站。

(3) 移动台辅助的越区切换。在该方式中, 网络要求移动台测量其周围基站的信号质量, 并把结果告诉当前基站。网络根据测试结果决定何时进行越区切换以及切换到哪一个基站。

在现有的系统中, PACS 和 DECT 系统采用了移动台控制的越区切换, IS-95 和 GSM 系统采用了移动台辅助的越区切换。

4. 越区切换时的信道分配

越区切换时的信道分配解决当呼叫要转到新小区时, 新小区如何分配信道这一问题。要使得越区失败的概率尽量小, 常用的做法是每个小区预留部分信道, 专门用于越区切换。这种做法的缺点是: 由于新呼叫使可用信道数减少, 要增加呼损率。但这样做减小了通话被中断的概率, 从而符合人们的使用习惯。

3.6.2 位置管理

在移动通信系统中, 用户可在系统覆盖范围内任意移动。为了能把一个呼叫传送到随机移动的用户, 就必须有一个高效的位置管理系统来跟踪用户的位置信息变化。

在现有的第二代数字移动通信系统中, 位置管理采用两层数据库, 即原籍 (归属) 位置寄存器 (HLR) 和访问位置寄存器 (VLR)。通常一个 PLMN 网络由一个 HLR (它存储着其网络内注册的所有用户的信息, 包括用户预定的业务、记账信息、位置信息等) 和若干个 VLR (一

个位置区由一定数量的蜂窝小区组成，VLR 管理该网络中若干位置区内的移动用户）组成。

1. 位置管理的任务

位置管理包括两个主要任务，即位置登记（Location Registration）和呼叫传递（Call Delivery）。位置登记的步骤是在移动台的实时位置信息已知的情况下，更新位置数据库（HLR 和 VLR）和认证移动台。呼叫传递的步骤是在有呼叫给移动台的情况下，根据 HLR 和 VLR 中可用的位置信息来定位移动台。

与上述两个问题紧密相关的另外两个问题是：位置更新（Location Update）和寻呼（Paging）。位置更新解决的问题是移动台如何发现位置变化及何时报告它的当前位置。寻呼解决的是如何有效地确定移动台当前处于哪一个小区。

位置管理涉及网络处理能力和网络通信能力。网络处理能力涉及数据库的大小、查询的频率和响应速度等；网络通信能力涉及传输位置更新、查询信息所增加的业务量和时延等。位置管理所追求的目标就是以尽可能小的处理能力和最少的附加业务量，来最快地确定用户的位置，以求容纳尽可能多的用户。

2. 位置登记和呼叫传递

在现有的移动通信系统中，将覆盖区域分为若干个登记区（Registration Area, RA）。在 GSM 系统中，登记区称为位置区（Location Area, LA）。当一个移动终端（MT）进入一个新的 RA 时，位置登记过程分为 3 个步骤：在管理新 RA 的新 VLR 中登记 MT（ T_1 ），修改 HLR 中记录服务区该 MT 的新 VLR 的 ID（ T_2 ），在旧的 VLR 和 MSC 中注销 MT（ T_3 、 T_4 ），其过程如图 3-27 所示。

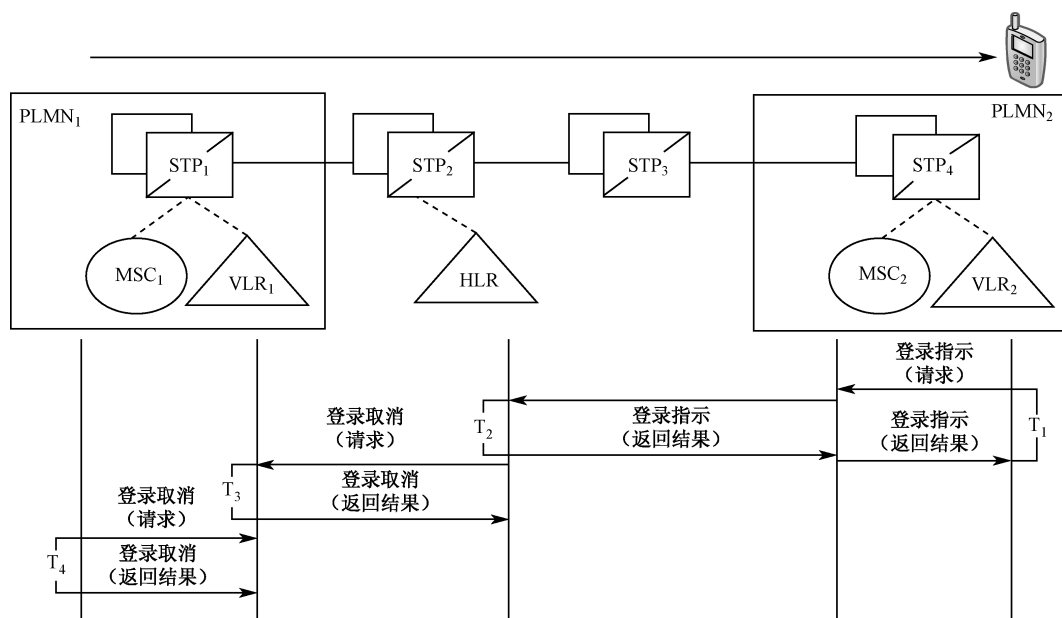


图 3-27 移动台位置登记过程

当移动终端（MT）从 PLMN₁ 移到 PLMN₂ 时，移动台向 PLMN₂ 的 MSC₂ 发出登录请求，MSC₂ 将在 VLR₂ 中登记 MT（ T_1 ），并将登录指示返回给 MT；随后 MSC₂ 修改 HLR 中记录服务区该 MT 的新 VLR 的 ID（ T_2 ），并将结果返回；之后，将 VLR₁ 和 MSC₁ 中关于 MT 的信息注销（ T_3 、 T_4 ）。

呼叫传递过程主要分为两步：确定被呼叫 MT 服务的 VLR 及确定被呼叫移动台正在访问哪个小区，呼叫传递过程如图 3-28 所示。由图可见，确定被呼叫 VLR 和数据库查询过程如下：

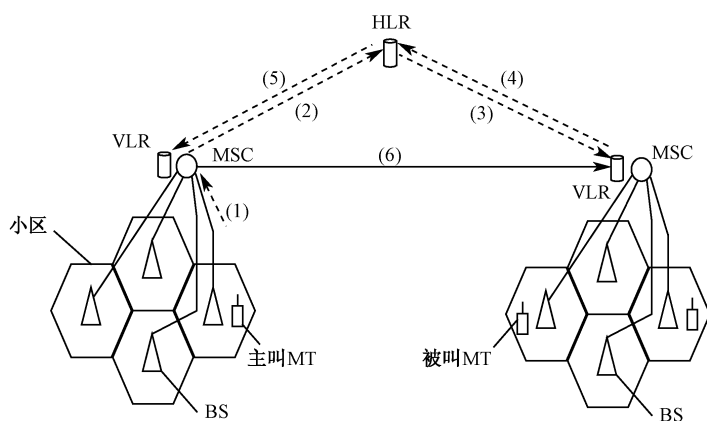


图 3-28 呼叫传递过程

(1) 主叫 MT 通过基站向其 MSC 发出呼叫初始化信号。

(2) MSC 通过地址翻译过程，确定被呼叫 MT 的 HLR 地址，并向该 HLR 发送位置请求消息。

(3) HLR 确定出为被叫 MT 服务的 VLR，并向该 VLR 发送路由消息；该 VLR 将该消息中转给为被叫 MT 服务的 MSC。

(4) 被叫 MSC 给被叫的 MT 分配一个称为临时本地号码 TLDN (Temporary Local Directory Number) 的临时标识，并向 HLR 发送一个含有 TLDN 的应答消息。

(5) HLR 将上述消息中转给为主叫 MT 服务的 MSC。

(6) 主叫 MSC 根据上述信息便可通过 SS7 网络向被叫 MSC 请求建立呼叫连接。

上述步骤允许网络建立从主叫 MSC 到被叫 MSC 的连接。但是由于每个 MSC 与一个 RA 相联系，而每个 RA 又有多个蜂窝小区，这就需要通过寻呼的方法，确定被叫 MT 在哪个蜂窝小区中。

3. 位置更新和寻呼

在移动通信系统中，将系统覆盖范围分为若干个登记区 (RA)。当用户进入一个新的登记区时，它将进行位置更新。当有呼叫到达该用户时，将在该 RA 内进行寻呼，以确定出移动用户在哪一个小区范围内。位置更新和寻呼信息都是在无线接口中的控制信道上传输的，因此必须尽量减少这方面的开销。在实际系统中，位置登记区越大，位置更新的频率就越低，但每次呼叫寻呼的基站数目就越多。在极限情况下，如果移动台每进入一个小区就送一次位置更新信息，则用户位置更新的开销将会非常大，但寻呼的开销很小；反之，如果移动台从不进行位置更新，这时如果有呼叫到达，就需要在全网络范围内进行寻呼，寻呼的开销非常大。

由于移动台的移动性和呼叫到达情况是千差万别的，因而一个 RA 很难对所有用户都是最佳的。理想的位置更新和寻呼机制应该能够基于每一个用户的情况来进行调整。这就需要动态的位置更新策略，动态位置更新主要有以下 3 种。

(1) 基于时间的位置更新策略。每个用户每隔 ΔT 秒周期性地更新其位置。 ΔT 的确定可由系统根据呼叫到达间隔的概率分布动态确定。

(2) 基于运动的位置更新策略。在移动台跨越一定数量的小区边界(运动门限)以后,移动台就进行一次位置更新。

(3) 基于距离的位置更新策略。当移动台离开上次位置更新后所在小区的距离超过一定的值(距离门限)时,移动台进行一次位置更新。最佳距离门限的确定取决于各个移动台的运动方式和呼叫到达参数。

基于距离的位置更新策略具有最好的性能,但实现它的开销最大。它要求移动台能有不同小区之间的距离信息,网络必须能够以高效的方式提供这样的信息。而对于基于时间和运动的位置更新策略,实现起来比较简单,移动台仅需要一个定时器或运动计数器就可以跟踪时间和运动情况。

3.7

习题

1. 填空题

- (1) 通话的用户以不同的_____称为多址。
- (2) 蜂窝技术是现代移动通信的_____, 是解决_____和用户容量问题的重大突破。
- (3) 在呼叫过程中, 有可能发生_____和_____意外情况。
- (4) 当以传输信号的_____不同来区分信道建立多址接入时, 称为频分多址方式(FDMA)。
- (5) 在语音通信中, 业务量的大小用_____来度量。话务量分为_____和_____话务量。
- (6) 对 FDMA 系统有影响的主要有_____干扰、_____干扰和_____干扰。
- (7) 在 TDMA 系统中, 设计每帧中的时隙结构通常要考虑到 3 个主要因素, 即_____, _____和系统的同步。
- (8) 在 TDMA 系统中, 每一个_____就是一个信道, 分配给_____个用户。
- (9) 在 TDD 方式中, 通常将在某一个频率上, 一帧中一半的时隙用于_____, 另一半的时隙用于_____, 这两种工作在相同的_____上。
- (10) 码分多址是以_____为基础的多址方式。CDMA 系统的一般模型是利用不同_____实现不同用户的信息传输。信号先由信源发出, 经过简单的信道编码, 再进行_____。
- (11) 通过空间的分割来区分不同的用户的多址方式为_____。在移动通信系统中, 能实现空间分割的基本技术就是采用_____, 在不同的用户方向上形成不同的波束。

2. 是非判断题(正确画√, 错误画×)

- (1) 蜂窝组网技术并没有采用点对点传输和广域覆盖的模式, 而是将一个移动通信服务区划分成很多正六边形小区, 以此为基本几何图形的小覆盖区域(蜂窝小区)。 ()
- (2) 在移动通信系统中, 呼损率越小, 成功呼叫的概率就越大, 用户就越满意。 ()
- (3) 信令的作用是保证用户信息有效且可靠地传输。 ()
- (4) 移动通信网的区域覆盖方式分为两类: 一是小容量的大区制, 另一类是大容量的小区制。 ()

- 制。 ()
- (5) 面状网的覆盖范围大, 主要用于覆盖公路、铁路、海岸等。 ()
- (6) 区群内小区数越多, 抗同频干扰性能就越好。 ()
- (7) 在移动通信网中, 为了使全网有秩序地工作, 除了要传输用户信息之外, 还要在正常通话的前后和过程中传输很多其他控制信号。 ()
- (8) 接入信令是基站到移动台之间的信令。 ()
- (9) 链路层信息帧的基本格式包括: 地址段、控制字段、长度指示段、信息段和填充段。 ()

3. 选择题 (将正确答案的序号填入括号中)

- (1) 在平面分布的蜂窝网中, 当考虑到要覆盖整个区域且没有重叠间隙的几何形状时, 只有 () 的覆盖面积最大, 交叠区的面积最小, 是最理想的几何图形。
- A. 正三角形 B. 正方形 C. 正六边形 D. 正八边形
- (2) 在 FDD 的工作模式, 系统为每一对用户分配一个信道, 即一对频谱。其中一个频谱用做前向信道, 即 () 向 () 方向的信道, 也叫 (), 另一个则用做反向信道。
- A. 移动台 基站 上行链路 B. 基站 移动台 下行链路
- C. 移动台 基站 下行链路 D. 基站 移动台 上行链路
- (3) 在越区切换的准则中, 带阈值的相对信号强度准则是指在当前基站信号足够 () 以至于 () 预设阈值, 而另一个基站比本基站信号强度强的情况下才进行切换。该方法中的阈值选择很重要, 如果阈值设定得太 (), 则容易发生乒乓效应。
- A. 弱 低于 高 B. 弱 低于 低 C. 强 高于 高 D. 强 高于 低

4. 简答题

- (1) 为什么说最佳小区的形状是正六边形?
- (2) 什么叫信令? 信令的功能是什么? 可分为哪几种信令?
- (3) 7 号信令网络包括哪些重要部分?
- (4) 在越区切换时, 采用什么信道分配的方法可以减小通信中断的概率? 与呼损率有何关系?
- (5) 组网技术包括哪些主要问题?
- (6) 移动通信网的基本结构包括哪些功能?

5. 画图题

- (1) 画出典型的 FDMA 系统的频谱分割示意图。
- (2) 以固定用户呼叫移动用户为例, 画出信令的工作过程。

6. 计算题

- (1) 一个电话连接持续时间为 23min, 这是该主叫用户在 1h 内发起的唯一一次连接, 这次连接的流量是多少 Erl?
- (2) 移动通信网中某小区共有 100 个用户, 平均每用户一天呼叫 5 次, 每次呼叫持续 180s, 集中系数 $k=15\%$ 。问若在保证呼损率小于 5%, 需要几个信道? 若允许呼损率达到 20%, 需要几个信道?

调研项目：移动通信组网技术的应用研究



调研目的：

1. 通过调研，了解我国移动通信组网技术的现状。
2. 通过对一个典型服务小区的调查，了解基站组成、小区结构、天线布局等。



调研要求：

1. 在调研的基础上，要按统一要求格式撰写 5 000 字左右的《关于我国移动通信组网技术的应用领域及现状》调查研究报告。
2. 调研资料要真实、可靠，论证要清晰、准确。



提示：

可利用图书馆、互联网等查阅有关资料，在有条件的情况下，可到有关科研院所、企业、公司进行调研。

实验 3 信号场强的测量



实验目的：

1. 了解某基站服务区的结构布局，掌握信号场强的测量方法。
2. 了解电波传播损耗。










实验方法：

1. 课前仔细阅读实验指导书，掌握场强仪的面板结构，了解有关测量仪器的使用方法。
2. 根据实验指导书的说明，结合实验设备，在老师的指导下，进行实验数据的测量。
3. 用场强仪测量距离基站天线不同位置的信号场强。
4. 注意实验过程中观察到的现象，做好数据记录，并进行分析。

>>> 第4章

GSM 移动通信系统

-  4.1 GSM 概述
-  4.2 GSM 系统的编码方式及应用
-  4.3 GSM 系统的无线接口与协议
-  4.4 GSM 系统的移动性管理
-  4.5 GSM 系统的安全管理
-  4.6 通用分组无线业务
-  4.7 习题

GSM 是全球移动通信系统（Global System of Mobile Communication）的简称，自 20 世纪 90 年代中期投入商用至今，全球超过 200 个国家和地区超过 10 亿人正在使用 GSM 电话。本章首先对 GSM 技术的发展历程、特点等作简要介绍，随后介绍 GSM 技术的基本原理、编码方式、无线接口与协议及 GSM 的移动性和安全性管理，最后介绍了通用无线分组业务。

4.1

GSM 概述

GSM 较之它以前的标准，最大的不同是它的信令和语音信道都是数字式的，因此 GSM 被看做第二代（2G）移动电话系统。采用 GSM 标准的设备占据当前全球蜂窝移动通信设备市场的 80% 以上，是当前应用最为广泛的移动电话标准。

4.1.1 GSM 系统的发展历史

GSM 是当今全球最成功的数字移动通信系统，它是一个典型的用来代替第一代模拟系统的第二代系统（2G）。在 20 世纪 80 年代初期，当模拟蜂窝移动通信系统刚投放市场时，欧洲的电信运营部门就发现它们的汽车电话远不如高速公路那么顺畅，整个欧洲的蜂窝系统分割成 5~6 种模拟移动制式，根本不能形成快速增长的市场所需求的经济规模。到了 1982 年，北欧四国向欧洲邮电行政大会 CEPT（Conference Europe of Post and Telecommunications）提交了一份建议书，要求制定 900MHz 频段的欧洲公共电信业务规范，建立全欧洲统一的蜂窝网移动通

信系统,以解决由于欧洲各国采用多种不同制式的蜂窝模拟系统而造成的互不兼容,无法提供漫游服务的问题。同年成立了欧洲移动通信特别小组,简称 GSM (Group Special Mobile)。起初,讨论的焦点是在制定模拟蜂窝系统还是数字蜂窝系统的标准上,直到 1985 年才决定制定数字蜂窝网标准。1986 年,在巴黎对欧洲经济各国经过大量研究和试验后所提出的 8 个数字蜂窝系统进行了现场试验。1987 年 5 月,GSM 成员国经过现场测试和论证比较,选定窄带 TDMA 方案。1988 年,18 个欧洲国家达成了 GSM 谅解备忘录,颁布了 GSM 标准,即泛欧数字蜂窝通信标准。最初欧洲开发的 GSM 上行链路是 890~915MHz,下行链路是 935~960MHz,这个系统现在也称为 GSM900,以与后续版本相区别。这些版本包括 1 800MHz 的 GSM (上行链路 1 710~1 785MHz,下行链路 1 805~1 880MHz),也称为 DCS (数字蜂窝系统) 1800。美国使用的 GSM 系统主要工作在 1 900MHz (上行链路 1 850~1 910MHz),也称为 PCS (个人通信业务) 1900。在 GSM 标准中,未对硬件做出规定,只对功能、接口等做了详细规定,以便于不同公司的产品可以互连互通。

4.1.2 GSM 系统的特点

GSM 数字蜂窝移动系统(简称 GSM 系统)是完全依据欧洲通信标准委员会(ETSI)制定的 GSM 技术规范而研制的,任何一家厂商提供的 GSM 数字蜂窝移动通信系统都必须符合 GSM 技术规范。GSM 系统作为一种开放式结构和面向未来设计的系统,具有以下主要特点。

1. GSM 系统的组成

GSM 系统由几个分系统组成,并且可与各种公用通信网(如 PSTN、ISDN、PDN 等)互连互通,各分系统之间或各分系统与各种公用通信网之间,都有明确和详细的标准化接口规范,保证任何厂商提供的 GSM 系统或子系统都能够互连。

2. GSM 系统的漫游功能

GSM 系统能够提供穿过国际边界的自动漫游功能,全部 GSM 移动用户都可以进入 GSM 系统而与国别无关。

3. GSM 系统的业务范围

GSM 系统除了可以开放语音业务之外,还可以开放各种承载业务、补充业务和与 ISDN 相关的业务。

4. GSM 系统的安全性

GSM 系统具有加密和鉴权功能,能确保用户信息的保密性和网络安全性。

5. GSM 系统的组网结构

GSM 系统具有灵活和方便的组网结构,频率复用率高,移动业务交换机的话务量承担能力一般都很强,保证在语音和数据通信两个方面都能满足用户对大容量、高密度业务的要求。

6. 通话质量

GSM 系统抗干扰能力强,覆盖区域内的通信质量较高。

7. GSM 系统终端发展趋势

随着大规模集成电路技术的进一步发展,GSM 系统终端设备(如手机等)将向着更小、更薄、更轻巧和增强功能的趋势发展。

4.1.3 GSM 系统的网络结构

数字蜂窝移动通信是在模拟蜂窝移动通信的基础上发展起来的,在网络组成、设备配置、网

络功能和工作方式上,二者都有相同之处。但是数字蜂窝网采用全数字传输,所以在实现技术和管理控制等方面与模拟蜂窝网有较大差异。总的来说,数字蜂窝网技术更先进,通信更可靠且功能更完备,并能方便地与其他数字通信网(如综合业务数字网 ISDN、公用数据网 PDN)互连互通。

GSM 蜂窝系统的网络结构如图 4-1 所示。由图可以看出, GSM 蜂窝系统的主要组成部分有移动终端、基站子系统和网络子系统。

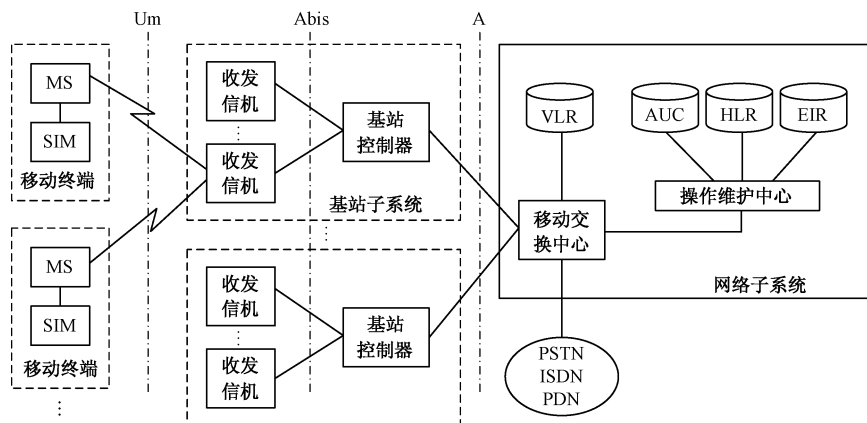


图 4-1 GSM 蜂窝系统的网络结构

基站子系统（BS）是由基站收发信机（BTS）和基站控制器（BSC）组成的；网络子系统由移动交换中心（MSC）、操作维护中心（OMC）、原籍位置寄存器（HLR）、访问位置寄存器（VLR）、鉴权中心（AUC）和移动设备识别寄存器（EIR）等组成。一个移动交换中心 MSC 可以管理多达几十个基站控制器 BSC，一个基站控制器最多可以控制 256 个基站收发信机。由移动终端、基站和网络子系统构成公用陆地移动通信网，该网络由 MSC 与公用电话网（PSTN）、综合业务数字网（ISDN）和公用数据网（PDN）进行互连。

1. 移动终端（MS）

在 GSM 移动用户通信网中，用户使用的设备称为移动终端。移动终端有多种类型，包括车载台、便携台和手机。其中手机因其小巧、轻便且功能较强，受到广大移动用户的青睐，手机用户占到移动用户的绝大多数。

移动终端由移动台和用户识别模块组成。移动台通过无线接口接入 GSM 系统，具有无线传输与处理功能。此外，移动台必须提供与使用者之间的接口。比如，为了完成通话呼叫所需要的话筒、扬声器、显示屏和各种按键；或者提供与一些其他终端设备之间的接口，比如个人计算机或传真机之间的接口。

移动终端的另外一个重要组成部分是用户识别模块（Subscriber Identity Module，SIM），也叫做 SIM 卡。它基本上是一张符合 ISO（开放系统互连）标准的“智慧”磁卡，其中包含与用户有关的无线接口的信息，也包括鉴权、加密和计费等信息。使用 GSM 标准的移动台都需要插入 SIM 卡，只有当处理异常的紧急呼叫时（如 119），才可以在不用 SIM 卡的情况下使用移动台。虽然 MS 可以通过国际移动设备识别码（IMEI）进行识别，但一个用户仍然可以通过 SIM 卡来对任何 MS 进行个性化设置，SIM 卡的应用使一部移动台可以为不同用户服务，GSM 系统是基于 SIM 卡来识别移动用户的，而不是基于设备本身，这为今后发展个人通信打下了基础。

2. 基站子系统（BSS）

一个基站子系统由一个基站控制器（BSC）和一个或多个基站收发信机（BTS）组成，它

是 GSM 系统的重要组成部分。BSS 通过无线接口与移动台相接，进行无线发送、接收及无线资源管理。除此之外，基站子系统与网络子系统（NSS）中的移动交换中心（MSC）相接，实现移动用户与固定网络用户之间或者移动用户之间的通信连接。另外，基站子系统为了适应无线与有线系统使用不同传输速率进行传输，还在 BSC 与 MSC 之间增加了码变换器和相应的复用设备。

3. 网络子系统（NSS）

网络子系统由移动交换中心（MSC）、操作维护中心（OMC）、原籍位置寄存器（HLR）、访问位置寄存器（VLR）、鉴权中心（AUC）和移动设备识别寄存器（EIR）等组成，对 GSM 移动用户之间的移动通信和移动用户与其他通信网用户之间的通信起着管理作用，主要功能包括交换、移动性管理与安全性管理等。NSS 由许多功能实体构成，它们之间的信令传输都符合 CCITT 信令系统 7 号协议。

4.1.4 GSM 系统的主要业务

从广义上说，GSM 的业务是指用户使用 GSM 系统所提供的设施进行的活动。也就是说，一项 GSM 业务就是 GSM 系统为了满足一个特殊用户的通信要求而向用户提供的服务。GSM 按照 ISDN 对业务的分类方法，将其业务分为基本业务和补充业务。GSM 系统支持的基本业务如图 4-2 所示，移动工作站 MS 通过 Um 接口和 GSM 公用陆地移动网（Public Land Mobile Network, PLMN）连接。PLMN 又和传输网络连接，如综合业务数字网（ISDN）或传统的公用交换电话网（PSTN）。在另一个终端连接之前，也可能有附加的终端网络。基本业务按其功能又可以分为电信业务（Teleservices，也称为用户终端业务）和承载业务（Bearer Services）。这两种业务是独立的通信业务，承载业务包括所有在接口和网络之间能够进行透明数据传输的业务。在传统的 GSM 模型中，承载业务是面向连接的并进行电路或分组交换，提供用户接入点（用户和网络的接口）间信号传输的能力。电信业务是指用户通信提供的包括终端设备功能在内的完整能力的通信业务。

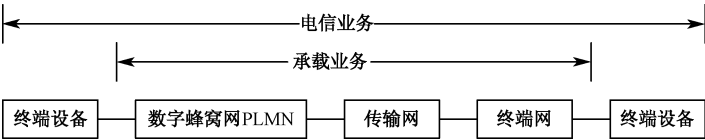


图 4-2 GSM 系统业务分类

1. 承载业务

GSM 为数据传输说明了不同的机制，最初的 GSM 系统允许非语音业务的数据传输速率可达 9 600bps。承载业务允许透明和非透明、同步或异步的数据传输。透明承载业务只采用物理层（第一层）来传输数据。因此，如果没有传输错误产生，数据传输就有恒定的时延和吞吐量。GSM 系统提供的主要承载业务如表 4-1 所示。“T”表示透明，“NT”表示不透明。

表 4-1 GSM 系统提供的主要承载业务

业 务 码	承载业务名称	透 明 属 性	业 务 码	承载业务名称	透 明 属 性
21	异步 300bps 双工电路型	T 或 NT	34	同步 9.6kbps 双工电路型	T 或 NT
22	异步 1.2kbps 双工电路型	T 或 NT	41	异步 PDA 接入 300bps 电路型	NT

续表

业 务 码	承载业务名称	透 明 属 性	业 务 码	承载业务名称	透 明 属 性
24	异步 2.4kbps 双工电路型	T 或 NT	42	异步 PDA 接入 1.2kbps 电路型	T 或 NT
25	异步 4.8kbps 双工电路型	T 或 NT	44	异步 PDA 接入 2.4kbps 电路型	T 或 NT
26	异步 9.6kbps 双工电路型	T 或 NT	45	异步 PDA 接入 4.8kbps 电路型	T 或 NT
31	同步 1.2kbps 双工电路型	T	46	异步 PDA 接入 9.6kbps 电路型	T 或 NT
32	同步 2.4kbps 双工电路型	T 或 NT	61	交替语音/数据	T 或 NT
33	同步 4.8kbps 双工电路型	T 或 NT	81	语音后接数据	T 或 NT

2. 电信业务

GSM 系统主要集中在语音电信业务上，GSM 提供的主要电信业务如表 4-2 所示。

表 4-2 GSM 提供的主要电信业务

电信业务类型	电信业务码	电信业务名称
语音传输	11	电话
	12	紧急呼叫
短消息业务	21	MS 终端的点对点短消息业务
	22	MS 起始的点对点短消息业务
	23	小区广播短消息业务
消息处理系统接入	31	先进消息处理系统接入
可视图文接入	41	可视图文接入子集 1
	42	可视图文接入子集 2
	43	可视图文接入子集 3
智能用户电报传送	51	智能用户电报
传真	61	交替语音和三类传真
	62	自动三类传真

1) 电话业务

在 GSM 系统所提供的业务中，最重要的业务就是电话业务。GSM 的主要目标是提供高质量的数字语音传输，为数字移动通信系统的用户和其他所有与其联网的用户之间提供带宽至少为 3.1kHz 的双向电话通信。

2) 紧急呼叫业务

在紧急情况下，移动用户通过一种简单的拨号方式即可拨通紧急服务中心。这种简单的拨号可以拨打紧急服务中心号码（欧洲统一使用 112，我国统一使用火警特殊号 119）。有些 GSM 移动台具有 SOS 键，一按此键就可以接通紧急服务中心。紧急呼叫业务优先于其他业务，并且自动在移动台没有插入用户识别卡的情况下，也可按键后接通紧急中心。

3) 短消息业务

短消息业务（Short Message Service，SMS）分为 3 类，包括 MS 起始、MS 终端的点对点

短消息业务及小区广播短消息业务。

点对点的短消息业务由短消息业务中心完成存储和前转功能。短消息业务中心是与 GSM 系统相分离的独立实体, SMS 消息不采用 GSM 的标准数据通道, 而采用信令通道未用的部分。SMS 消息不仅可服务于 GSM 用户, 也可服务于具备接收短消息业务功能的固定网络用户。点对点消息的发送或接收, 应在呼叫状态或空闲状态下进行, 由控制信道传输短消息业务, 其消息量限制为 160 个字符。值得一提的是, 如今每月全世界要发送超过 300 亿条短信, 无论是对网络运营商还是对内容提供商, SMS 都是一项重大的业务。

小区广播短消息业务是指 GSM 移动通信网以有规则的间隔向移动台广播具有通用意义的短消息, 如道路交通信息、天气预报等。移动台连续不断地监视广播消息, 并能在显示器上显示广播消息。此短消息也是在控制信道上传送的, 移动台只有在空闲状态下才可接收广播消息, 其消息量限制为 93 个字符。

4) 可视图文接入

可视图文接入是一种通过网络完成文本、图形信息检索和电子函件功能的业务。

5) 智能用户电报传送

智能用户电报传送能够提供智能用户电报终端间的文本通信业务。此类终端具有文本信息的编辑、存储和处理等能力。

6) 传真业务

传真业务主要有交替语音和三类传真及自动三类传真两类, 交替语音和三类传真是指语音与三类传真交替传送的业务; 自动三类传真是指能够使用户经过 GSM 网, 以传真编码信息文件的形式自动交换各种函件的业务。

3. 附加业务

除了电信业务和承载业务之外, GSM 供应商还提供一些附加业务, 相当于基本电信业务的增强或补充。主要附加业务包括: 计费提示 (AOC)、交替线业务 (ALS)、来话限制 (BAIC)、呼出限制 (BOC)、限制所有打出去的国际电话 (BOIC)、遇忙呼叫前转 (CFB)、无应答呼叫前转 (CFNA)、无条件呼叫前转 (CFU)、呼叫保持、呼叫等待 (CW)、主叫线识别显示 (CLIP)、会议呼叫 (CONF) 等。类似于 ISDN 网, 这些业务对传统的电话业务都有不同的增强, 各供应商所提供的业务可能不同。典型的业务如用户身份识别、呼叫重定向等, 还可以提供一些标准的 ISDN 功能, 如封闭用户群和多方通话等。对于一些公司来说, 封闭用户群特别有用, 因为它能提供一个公司专用的 GSM 子网, 只有此用户群的成员才能访问这一子网。

4.2

GSM 系统的编码方式及应用

数字语音信号在无线传输时主要面临 3 个问题: 一是选择低速率的编码方式, 以适应有限带宽的要求; 二是选择有效的编码方法减小误码率, 即信道编码问题; 三是选用有效的调制方法, 减少杂波辐射, 降低干扰。GSM 系统的编码方式主要有语音编码和信道编码。GSM 系统的语音编码和信道编码的组成框图如图 4-3 所示。其中语音编码主要由规则脉冲激励长期预测编码 (RPE-LTP 编译码器) 组成, 而信道编码归入无线子系统, 主要包括纠错编码和交织技术。

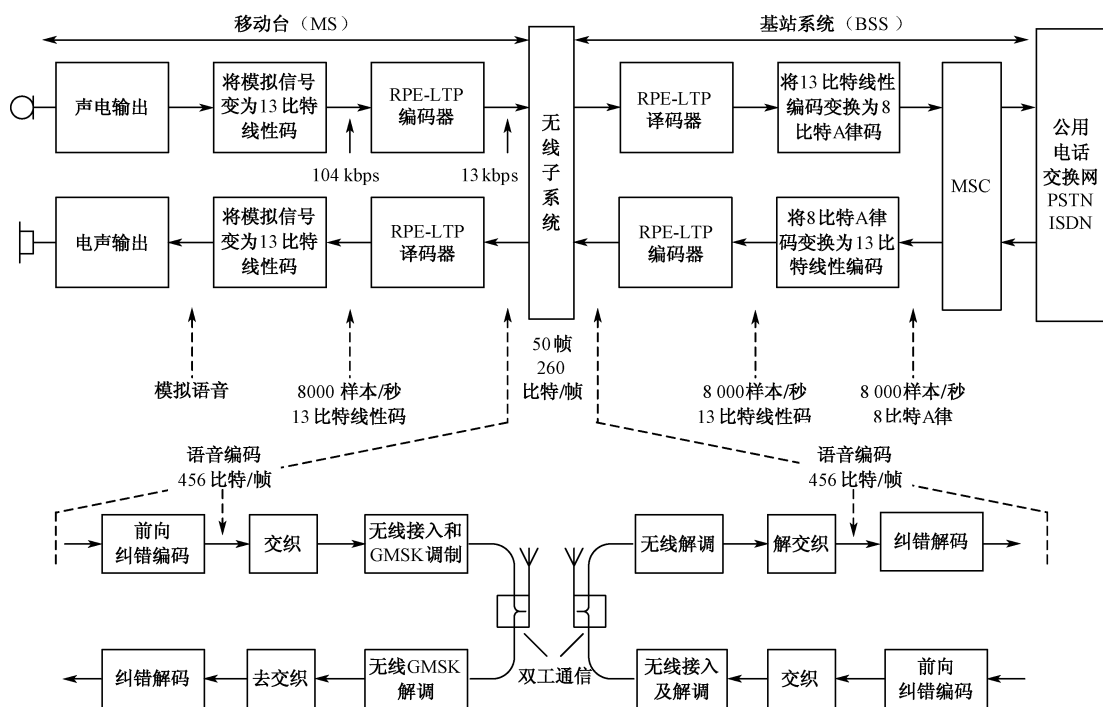


图 4-3 GSM 系统语音和信道编码组成框图

RPE-LTP 编码器是将波形编码器和声码器两种技术综合运用的编码器，从而以较低速率获得较高的语音质量。模拟语音信号数字化后，送入 RPE-LTP 编码器，此编码器每 20ms 取样一次，输出 260b，这样编码速率为 13kbps。然后，进行前向纠错编码。纠错的办法是在 20ms 的语音编码帧中，把语音比特分为两类：第一类是对差错敏感的比特（该类比特发生误码时，将明显影响语音质量），每个语音编码帧占 182b；第二类是对差错不敏感的比特，每个语音编码帧占 78b。第一类比特加上 3 个奇偶校验比特和 4 个尾比特后共有 189b，进行信道编码，也称为前向纠错码。GSM 系统中码元均有约束关系，共输出 378b，它和不加差错保护的 78b 合在一起共计 456b。通过卷积编码后速率为 $456\text{b}/20\text{ms}=22.8\text{kbps}$ ，其中包括原始语音速率 13kbps、纠错编码速率 9.8kbps。卷积编码后，数据再进行交织编码，以对抗在移动通信系统中，由于多径衰落而导致数字信号传输的突发性错误。

在 GSM 系统中，交织编码器的输入码流是 20ms 的帧，每帧有 456b。将每两帧（40ms）共 912b 组成一个 8×114 （ $8\times 114=912\text{b}$ ）的矩阵，如图 4-4 所示。按水平写入、垂直读出的顺序进行交织。即按照每行 8 位写入，共写入 114 行；按照每列读出，每次读出 114b，恰好对应 GSM 的一个 TDMA 时隙（在 GSM 系统中每个载频上含有 8 个时隙）。将输入码流长为 20ms 帧中的 456b 分成 8 段，每段含有

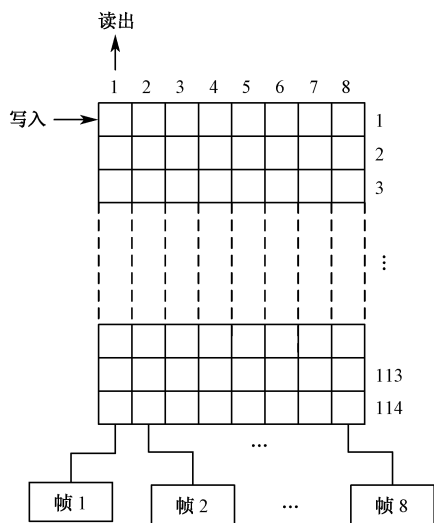


图 4-4 交织编码矩阵

57b。交织是在 40ms，共 912b 间进行的。也就是说，将 912b 字符交织后分散到 8 个 TDMA 帧的时隙中来传输。

由图 4-4 可以看出，交织编码的实质是把一个较长的突发误码分散成为随机误码，再用纠正随机误码的编码技术（如卷积编码技术）消除随机误码。显然交织的程度越深，抗突发错误的能力就越强。

4.3 GSM 系统的无线接口与协议

GSM 数字蜂窝网的无线接口即 U_m 口，是系统中最重要接口，即通常所称的空中接口。

4.3.1 GSM 系统信道结构

GSM 系统中，由若干小区（3 个、4 个或 7 个）构成一个区群，区群内不能使用相同的频道，同频道小区的距离保持相等，每个小区有多个载频，每个载频上含有 8 个时隙，也就是说每个载频有 8 个物理信道，信道示意图如图 4-5 所示。纵坐标是载频的频率坐标轴，横坐标是时间坐标轴，所以 GSM 系统是时分多址/频分多址的接入方式。

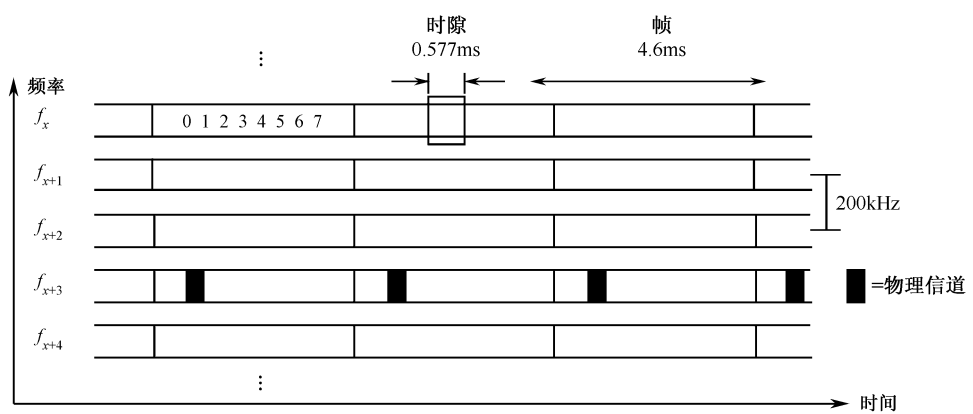


图 4-5 TDMA/FDMA 接入方式

GSM 系统工作的射频频段是：上行（移动台发、基站收）890~915MHz，下行（基站发、移动台收）935~960MHz，收发频率间隔为 45MHz。

移动台采用较低频段发射，传播损耗较低，有利于补偿上、下行功率不平衡问题。

由于载频间隔为 0.2MHz，因此 GSM 整个工作频段分为 124 对载频，其频道序号用 n 表示，则上、下行两频段中序号为 n 的载频可用式（4-1）和式（4-2）计算。

上行频段： $f_1(n) = 890 + 0.2n(\text{MHz})$ (4-1)

下行频段： $f_b(n) = 935 + 0.2n(\text{MHz})$ (4-2)

式中， $n=1\sim124$ 。例如 $n=2$ ， $f_1(n)=890.4\text{MHz}$ ， $f_b(n)=935.4\text{MHz}$ 。前面已经指出每个载频有 8 个时隙，因此 GSM 系统总共有 $124\times8=992$ 个物理信道。

GSM 的调制方式是高斯型最小频移键控（GMSK）方式，矩形脉冲在调制器之前先通过一个高斯滤波器。这一调制方案由于改善了频谱特性，从而能满足 CCIR 提出的相邻信道功率

电平小于 -60dBW 的要求。高斯滤波器归一化带宽 $B_f=0.3$ ，基于 200kHz 的载频间隔及 170kbps 的信道传输速率，其频谱利用率为 $(1.35\text{bps})/\text{Hz}$ 。GSM系统中，基站发射功率为每载波 500W ，每个时隙平均为 $500/8=62.5\text{W}$ 。移动台发射功率分别为 0.8W 、 2W 、 5W 、 8W 和 20W 五种，可供用户选择。小区覆盖半径最大为 35km ，最小为 500m ，前者适用于农村地区，后者适用于市区。由于系统采取了多种抗干扰措施（如自适应均衡和纠错编码等），同频道射频防护比可降到 $C/I=9\text{dB}$ ，因此在业务密集区，可采用3小区9扇区的区群结构。

4.3.2 GSM 网络接口

在实际的GSM通信网中，由于网络规模、运营环境及设备生产厂家不同，上述各个部分可以有不同的配置方法。如把MSC和VLR合并在一起，或者把HLR、EIR和AUC合并为一个实体等。不过，为了使各个厂家所生产的设备可以兼容，上述各个部分的连接都必须严格符合规定的接口标准及相应的协议。GSM系统各个部分之间的接口如图4-6所示，包括各种功能接口。

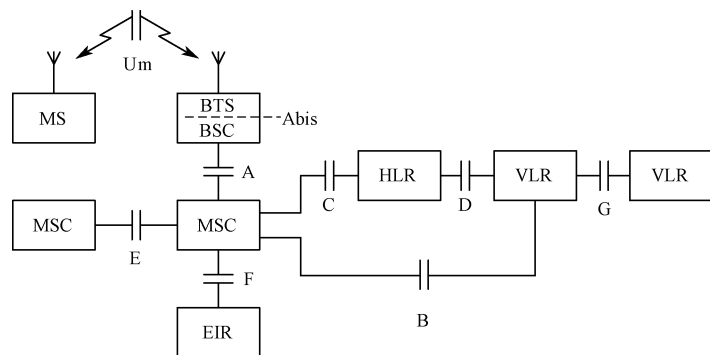


图 4-6 GSM 系统的接口

1. 主要接口

GSM系统的主要接口是指A接口、Abis接口和Um接口。这3种接口的定义和标准化可以保证不同厂家的移动台、基站子系统和网络子系统设备能够纳入同一个GSM移动通信系统中运行和使用。

A接口定义为网络子系统（NSS）与基站子系统（BSS）之间的通信接口，从系统的功能实体而言，就是移动交换中心（MSC）与基站控制器（BSC）之间的互连接口，其物理连接是通过采用标准的 2.048Mbps PCM数字传输链路来实现的。此接口传送的信息包括对移动台及基站的管理、移动性及呼叫接续管理。

Abis接口定义为基站子系统的基站控制器（BSC）和基站收发信机（BTS）两个功能实体之间的接口，用于BTS（不与BSC放在一起）与BSC之间的远端互连方式。它是通过采用标准的 2.048Mbps 或 64kbps PCM数字传输链路来实现的。此接口支持所有向用户提供的服务，并支持对BTS无线设备的控制和无线频率的分配。

Um接口（空中接口）定义为移动台（MS）与基站收发信机（BTS）之间的无线通信接口，它是GSM系统中最重要、最复杂的接口，包含了之前所介绍的用于多路复用和媒质接入的许多机制。此接口传递的信息包括无线资源管理、移动性管理和接续管理等。

2. 网络子系统内部接口

网络子系统内部接口包括B、C、D、E、F、G接口。

B 接口定义为移动交换中心（MSC）与访问位置寄存器（VLR）之间的内部接口，用于 MSC 向 VLR 询问有关移动台（MS）当前位置信息或者通知 VLR 有关 MS 的位置更新信息等。

C 接口定义为 MSC 与 HLR 之间的接口，用于传递路由选择和管理信息，两者之间是采用标准的 2.048Mbps PCM 数字传输链路来实现的。

D 接口定义为 HLR 与 VLR 之间的接口，用于交换移动台位置和用户管理的信息，保证移动台在整个服务区内能建立和接收呼叫。由于 VLR 综合于 MSC 中，因此 D 接口的物理链路与 C 接口相同。

E 接口为相邻区域的不同移动交换中心之间的接口，用于移动台从一个 MSC 控制区到另一个 MSC 控制区过渡时有关信息的交换，以完成越区切换。此接口的物理连接方式是采用标准的 2.048Mbps PCM 数字传输链路来实现的。

F 接口定义为 MSC 与移动设备标识寄存器（EIR）之间的接口，用于交换相关的管理信息。此接口的物理连接是采用标准的 2.048Mbps PCM 数字传输链路来实现的。

G 接口定义了两个 VLR 之间的接口。当采用临时移动用户识别码（TMSI）时，此接口用于向分配 TMSI 的 VLR 询问此移动用户的国际移动用户识别码（IMSI）信息。G 接口的物理链接方式与 E 接口相同。

3. GSM 系统与公用电信网互连

GSM 系统通过 MSC 与公用电信网互连，一般采用 7 号信令系统接口。其物理链接方式是通过在 MSC 与 PSTN 或 ISDN 交换机之间采用 2.048Mbps PCM 数字传输链路来实现的。

4.3.3 GSM 协议结构

在 GSM 协议结构中的信令和接口中，最主要的还是 Um 接口，因为其他接口在固定网络内实体之间。

1. 物理层

第一层是物理层，实现所有特定的无线功能。Um 接口的物理层采用 GMSK 进行数字调制，并实现数据的加密和解密，也就是说，加密并不是端到端地执行，而是通过空中接口在 MS 和 BSS 之间进行的。信令的协议体系结构如图 4-7 所示。

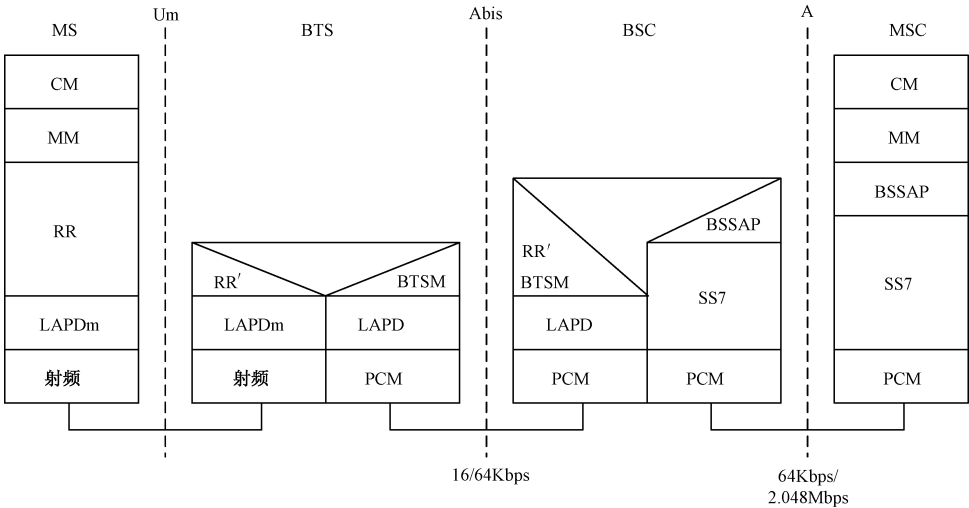


图 4-7 GSM 信令的协议体系结构

同步也包括在 MS 和 BTS 之间实现对单个路径延迟的校正,一个小区里面的所有 MS 都使用同一个 BTS,因此必须与该 BTS 保持同步。BTS 产生帧的时间结构、时隙等。在这种情况下,一个问题就是不同的往返时间(RTT)。一个接近 BTS 的 MS 具有非常短的 RTT,而一个 35km 以外的 MS 所具有的 RTT 大约有 0.23ms。如果较远的 MS 使用没有校正的时隙结构,则需要较大的保护间隔,这是因为 0.23ms 已经是每一个时隙可用的 0.577ms 的 40%。因此,BTS 发送当前的 RTT 给 MS,然后 MS 调整它的接入时间,这样所有的突发脉冲序列就能在它们的限制范围内到达 BTS。这种机制把保护间隔减小到 30.5 μ s,即时隙的 5%。接入时间的调整由可变定时提前量控制,这样突发脉冲序列就能够提前 63b 的时间接入,而每一比特的持续时间为 3.96 μ s (从而得到所需要的 0.23ms)。由于可变定时的提前量不能扩大,因此突发脉冲序列的接入不能早于 63b 时间。除此之外也可能在更远的距离上接收信号,但为了避免 BTS 之间发生冲突,所以不允许接入。这就是 MS 和 BTS 之间最大距离只能是 35km 的原因。

物理层的任务包括信道编码和检错/纠错,这些都直接与编码机制结合。信道编码可充分利用不同的前向纠错(FEC)机制。FEC 在用户数据中增加冗余码,从而可对一些有选择的错误进行检错和纠错。FEC 的纠错能力主要取决于冗余量、编码算法和为了最小化突发错误的影响而对数据进行的进一步交织编码。

2. 逻辑层

GSM 的不同逻辑信道使用具有不同纠错能力的不同编码方案。为了达到 22.8kbps 的数据速率(来自语音编码/解码器的 13kbps 的数据加上冗余码、CRC 比特和交织(Goodman, 1997)),模数转换后,语音信道对语音数据进行额外编码。由于语音被认为是 GSM 中最主要的业务,所以物理层也包括一些特定的功能,如语音激活检测(Voice Activity Detection, VAD),仅在语音信号的时候才进行语音数据传输。这种机制有助于减少干扰,因为一个语音信道 60%的时间是空的(假设同一时间只有一个用户在说话,而且由一个用户说话换成另一个用户说话需要一些额外的时间)。在沉默时期(例如用户在谈话之前需要时间进行思考),物理层会产生一种适度噪声来伪造连接(完全的安静可能会使用户感到迷惑),但事实上并没有进行传输。而且,这种噪声会和通话双方各自的当前背景噪声相适应。

在 GSM 网络中,实体之间的信令传输是需要高层支持的,如图 4-7 所示。为了达到这个目的,第二层的 Um 接口定义了 LAPDm 协议。顾名思义,LAPDm 来自 ISDN 系统中 D 信道的链路访问规程(LAPD),LAPD 是 HDLC 的一个版本。LAPDm 是一种较小的 LAPD,因为它既不需要同步标识,也不需要用于错误检测和校验(GSM 的物理层已经完成了这一功能)。LAPDm 在连接上提供可靠数据传输、数据帧的重发序列及流控制。由于在第一层和第二层之间没有缓冲,LAPDm 必须遵从 Um 接口所定义的帧结构、重发模式等。LAPDm 所提供的业务包括数据分段、数据重组、传输数据确认/不确认。

3. 网络层

GSM 中的第三层是网络层,其中包含了如图 4-7 所示的一些子层。最低的子层是无线资源管理层(Radio Resource Management, RR)。这一层中只有部分 RR'是在 BTS 中实现的,而剩余的部分位于 BSC 中。BSC 通过 BTS 管理器(BTS Management, BTSM)支持实现 RR'功能。RR 的主要任务是建立、维护和释放无线信道。为了传输射频信息,RR 也能够直接访问物理层,并提供与下一个高层建立的可靠连接。

移动性管理(Mobility Management, MM)包含注册、鉴权、识别、位置更新、提供临时

移动用户识别码 (Temporary Mobile Subscriber Identity, TMSI) 等功能, 该 TMSI 码代替国际用户识别码 (IMSI), 并在无线接口中隐藏 MS 用户实际识别码。IMSI 可对用户进行识别, 而 TMSI 仅仅在 VIR 的当前区域中有效。MM 也提供与下一个高层的可靠连接。

4. 呼叫管理层

呼叫管理 (Call Management, CM) 层包括呼叫控制 (Call Control, CC)、短信业务 (Short Message Service, SMS) 和附加业务 (Supplementary Service, SS) 3 个实体。SMS 使用控制信道 SDCCH 和 SACCH 进行消息传输 (在没有信令数据发送的情况下), 而 SS 提供在前面描述的业务。CC 提供两个终端之间点对点的连接, 较高层使用 CC 来建立呼叫、清除呼叫和改变呼叫参数。这一层也能够在 GSM 网络中提供发送带内信号音的功能, 即双音多频 (DTMF)。这些信号音不能直接在 GSM 系统 MS 的语音编码/解码器上发送, 因为编/解码可能会失真。所以这些信号音要先作为信号发送, 然后在 GSM 系统的固定网络部分转换为信号音。

Abis 和 A 接口还使用一些附加的协议 (这里并不涉及 GSM 系统的内部接口)。物理层数据传输通常采用脉冲编码调制 (Pulse Code Modulation, PCM) 系统。PCM 系统提供 64kbps 的透明信道, 而 GSM 也允许将 4 个 16kbps 的信道复用成一个 64kbps 的信道 (对于一个来自 MS 的用户而言, 16kbps 已经足够了)。A 接口的物理层通常包含具有 2.048Mbps 容量的租用线路。LAPD 用于 Abis 第二层, 用于 BTS 的管理。

MSC 和 BSC 之间的信令传输使用的是 7 号信令系统 (Signaling System No.7, SS7)。协议还包括在 MSC、HLR、VLR、AUC、EIR 和 OMC 之间传输各种管理信息。另外, MSC 也能够通过 BSS 应用部分 (BSS Application Part, BSSAP) 来控制 BSS。

4.4

GSM 系统的移动性管理

移动性管理 (Mobility Management, MM) 包含位置登记、鉴权、识别、位置更新、提供临时移动用户识别码等功能。GSM 系统的一个基本特征就是能够自动地在全球范围内对用户进行定位, 它是一种功能繁多且设备复杂的通信网络, 无论是移动用户与市话用户, 还是移动用户之间建立通信, 都必须涉及系统中的各种设备。下面着重讨论 GSM 系统的移动特性管理中的几个主要问题, 包括位置登记与更新、鉴权与保密、呼叫接续和越区切换等。

4.4.1 位置更新

由于数字蜂窝网的用户密度大于模拟蜂窝网, 因而位置登记的过程必须要更快、更精确。

1. 位置登记

位置登记也称为注册, 是通信网为了跟踪移动台的位置变化, 而对其位置进行登记、删除和更新的过程。

位置信息存储在原籍位置寄存器 (HLR) 和访问位置寄存器 (VLR) 中。GSM 蜂窝通信系统把整个网络的覆盖区域划分为许多位置区, 并以不同的位置区标志进行区别, 如图 4-8 中所示的 LA₁、LA₂、LA₃……

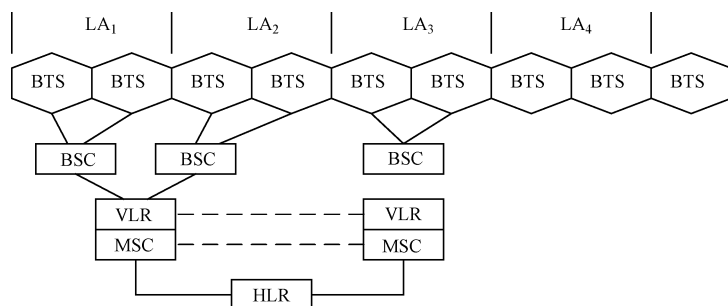


图 4-8 位置区分示意图

当一个移动用户首次入网时，必须通过移动交换中心（MSC）在相应的位置寄存器（HLR）中登记注册，将其有关的参数（如移动用户识别码、移动台编号及业务类型等）全部存放在这个位置寄存器中，于是网络就把这个位置寄存器称为原籍位置寄存器。

2. 位置更新

GSM 系统的基本特征，就是能够自动地在全球范围内对用户进行定位。系统总是知道用户当前位置在哪里，并且同一个电话号码在世界范围内都有效。为了提供这项业务，即使用户不使用 MS（假设 MS 仍然在 GSM 网络中登录，而没有彻底关机），GSM 也能够实现定期的位置更新。

对于 MS 的定位和寻址需要如下几个识别码：

（1）移动工作站 ISDN 号码（MSISDN）。对于 GSM 系统来说，唯一重要的号码就是电话号码。应该注意的是该电话号码并不与某一设备关联，而是和用户的 SIM 卡关联。

（2）国际移动用户识别码（IMSI）。GSM 使用 IMSI 对用户进行内部唯一识别。IMSI 由 3 部分组成：移动国家号码（MCC）；移动网号（MNC），即网络运营商代码；还有移动用户识别号码（MSIN）。

（3）临时移动用户识别码（TMSI）。由于在用户通过空中接口进行通信的时候，IMSI 可能会泄露用户真实身份，所以为了隐藏 IMSI，GSM 使用 TMSI 来对当地的用户进行识别。

（4）移动站漫游号码（MSRN）。另一个隐藏用户身份和位置的临时号码为 MSRN。VLR 根据 MSC 的请求，产生这个地址，这个地址存储在 HLR 中。

移动台的不断运动将导致其位置不断变化。这种变化的位置信息由另一种位置寄存器，即访问位置寄存器（VLR）进行登记。移动台可能远离其原籍地区而进入其他地区访问，该地区的 VLR 要对这种来访的移动台进行位置登记，并向该移动台的 HLR 查询其有关参数。此 HLR 要临时保存 VLR 提供的位置信息，以便为其他用户（包括固定的市话用户或另一个移动用户）呼叫此移动台提供所需的路由。VLR 所存储的位置信息不是永久性的，一旦移动台离开它的服务区，该移动台的位置信息即被删除。

位置区的标志在广播控制信道（BCCH）中播送，移动台开机后，就可以搜索此 BCCH，从中提取所在位置区的标志。如果移动台从 BCCH 中获取位置区标志，就是它原来用的（上次通信所用）位置标识，则不需要进行位置更新。如果两者不同，则说明移动台已经进入新的位置区，必须进行位置更新，于是移动台将通过新位置区基站发出位置更新的请求。移动台可能在不同情况下申请位置更新。

不同情况下，进行过区位置登记的具体过程会有所不同，但基本方法都是一样的。涉及两个 VLR 的位置更新过程如图 4-9 所示。

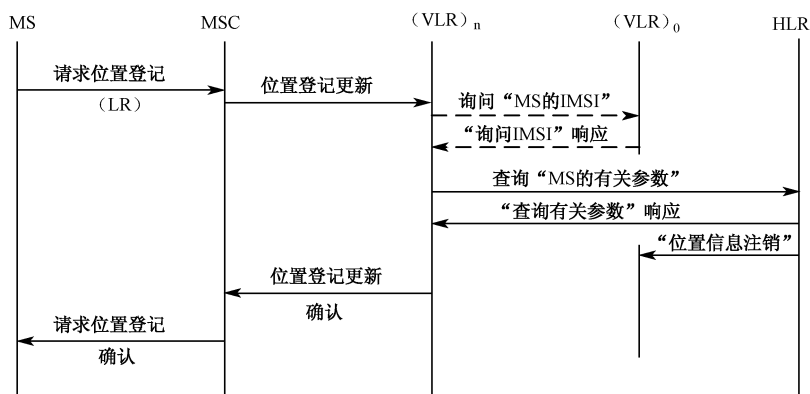


图 4-9 位置登记过程举例

当移动台进入某个访问区并需要进行位置登记时，它就向该区的 MSC 发出“位置登记请求 (LR)”，若 LR 中携带的是“国际移动用户识别码 (IMSI)”，新的访问位置寄存器 (VLR)_n 在收到 MSC “更新位置登记” 的指令后，可根据 IMSI 直接判断出该移动台 (MS) 的原籍位置寄存器 (HLR)。(VLR)_n 给该 MS 分配漫游号码 (MSRN)，并向该 HLR 查询 MS 的有关参数。获得成功后，再通过 MSC 和 BS 向 MS 发送“更新位置登记” 的确认信息。HLR 要对该 MS 原来的移动参数进行修改，还要向原来的访问位置寄存器 (VLR)₀ 发送“位置信息注销” 指令。如果 MS 是利用“临时用户识别码 (TMSI)” (由 (VLR)₀ 分配的) 发起“位置登记请求”，(VLR)_n 在收到后，必须先向 (VLR)₀ 询问该用户的 IMSI。如询问操作成功，新的访问位置寄存器再给该 MS 分配一个新的 TMSI，接下去的过程和上面一样。如果 MS 因故未收到“确认” 信息，则此次申请失败，可以重复发送 3 次申请，每次间隔至少是 10s。

移动台可能处于激活 (开机) 状态，也可能处于非激活 (关机) 状态。移动台转入非激活状态时，要在有关的 HLR 和 VLR 中设置一个特定的标志，使网络拒绝向该用户呼叫，以免在无线链路上发送无效的寻呼信号，这种功能称为“IMSI 分离”。当移动台由非激活状态转为激活状态时，移动台取消此标志，恢复正常工作，这种功能称为“IMSI 附着”。两者统称为“IMSI 分离/附着”。

当 MS 向网络发送“IMSI 附着” 消息时，因无线链路质量很差，所以有可能造成错误，即网络认为 MS 仍然为分离状态。反之，当 MS 发送“IMSI 分离” 消息时，因为收不到信号，网络也会错误地认为该 MS 处于“附着” 状态。为了解决上述问题，系统还采取周期性登记方式，例如要求 MS 每 30min 登记一次。这时，若系统没有接收到某 MS 的周期性登记，VLR 就以“分离” 做标记，称为“隐分离”。

网络通过 BCCH 通知 MS 其周期性登记的时间。周期性登记程序中有证实消息，MS 只有接收到此消息后才停止发送登记消息。

4.4.2 呼叫建立

移动用户“主叫”和“被叫”的接续过程是不同的，下面分别讨论移动用户向固定用户发起呼叫 (移动用户为主叫) 和固定用户呼叫移动用户 (移动用户被叫) 的接续过程。

1. 移动用户主叫

移动用户向固定用户发起呼叫接续过程，如图 4-10 所示。移动台 (MS) 在随机接入信道 (RACH) 上，向基站 (BS) 发出“请求分配信道” 信息，若 BS 接收成功，就给这个 MS 分配

一个专用控制信道，即在准许接入信道（AGCH）上向 MS 发出“立即分配”指令。MS 在发起呼叫的同时，设置一个定时器，在规定的时间内可重复呼叫。如果按预定的次数重复呼叫后，仍收不到 BS 应答，则放弃这次呼叫。

MS 收到“立即分配”指令后，利用分配的专用控制信道（DCCH）与 BS 建立起信令链路，经 BS 向 MSC 发送“业务请求”信息。MSC 向 VLR 发送“开始接入请求”应答信令。VLR 收到后，经 MSC 和 BS 向 MS 发出“鉴权请求”，其中包含一随机数（RAND），MS 按鉴权算法 A₃ 进行处理后，向 MSC 发回“鉴权”响应信息。如果鉴权通过，承认此 MS 的合法性，VLR 就给 MSC 发送“置密模式”信息，由 MSC 经 BS 向 MS 发送“置密模式”指令。MS 收到并完成置密指令后，要向 MSC 发送“置密模式完成”的响应信息。鉴权和置密完成后，VLR 才向 MSC 作为“开始接入请求”应答。为了保护 IMSI 不被监听或盗用，VLR 将给 MS 分配一个新的 TMSI，其分配过程如图 4-10 中虚线所示。

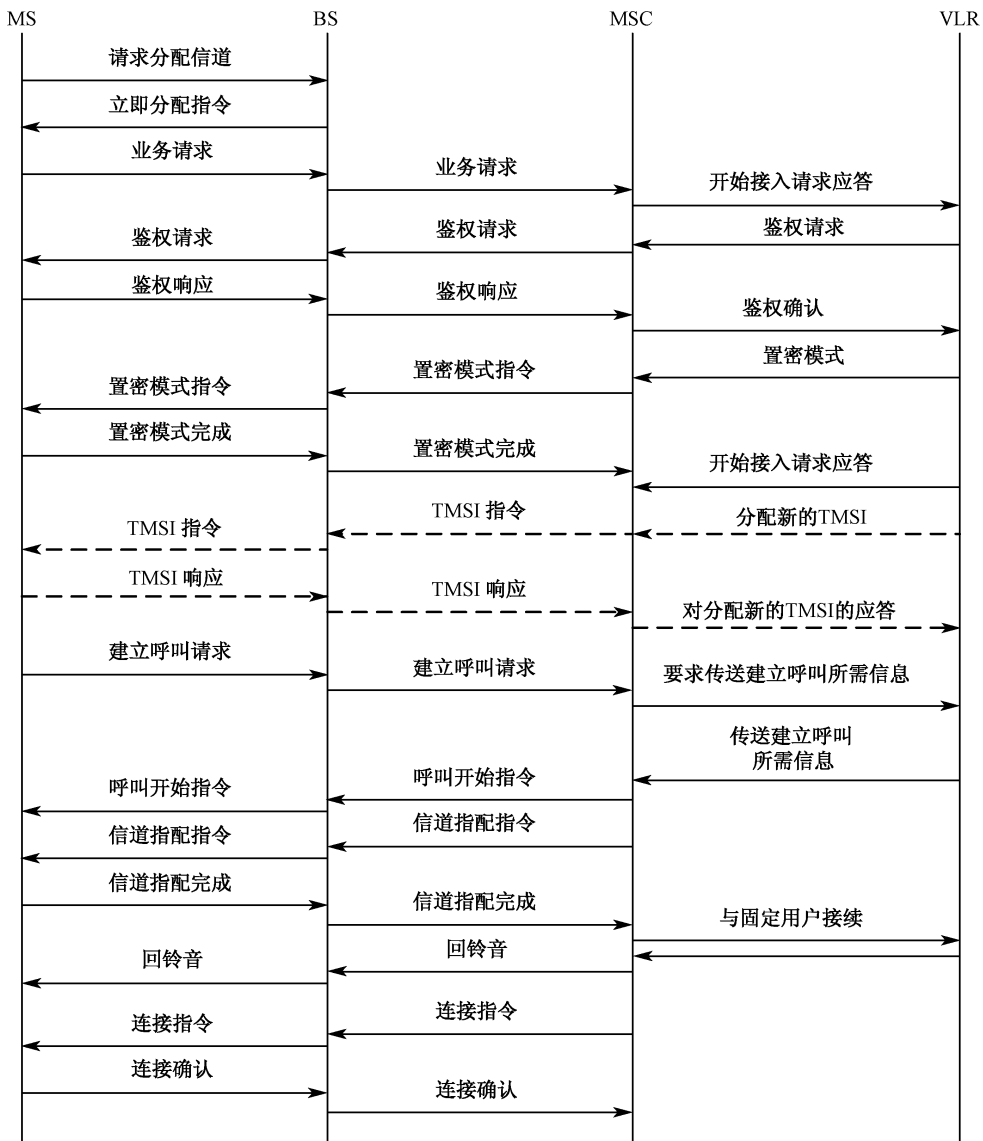


图 4-10 移动用户主叫时的接续过程

接着 MS 向 MSC 发出“建立呼叫请求”，MSC 收到后，向 VLR 发出指令，要求它传送建立呼叫所需的信息。如果成功，MSC 即向 MS 发出“呼叫开始”指令，并向 BS 发出分配无线业务信息的“信道指配”指令。

如果 BS 有空闲的业务信道（TCH），即向 MS 发出“信道指配”指令。当 MS 得到业务信道时，向 BS 和 MSC 发送“信道指配完成”的信息。

MSC 在无线链路和地面有线链路建立后，把呼叫接续到固定网络，并和被呼叫的固定用户建立连接，然后给 MS 发送回铃音。被呼叫的用户摘机后，MSC 向 BS 和 MS 发送“连接”指令，待 MS 发回“连接”确认后，即转入通信状态，从而完成 MS 呼叫固定用户的整个接续过程。

2. 移动用户被叫

固定用户向移动用户发起呼叫的接续过程如图 4-11 所示。固定用户向移动用户拨出号码之后，固定网络把呼叫接续到就近的移动交换中心，此移动交换中心在网络中起到入口（Gate Way）的作用，记做 GMSC。GMSC 立即向相应的 HLR 查询路由信息，HLR 在其保存的用户位置数据库中查出被呼 MS 所在的地区，并向该区的 VLR 查询该 MS 的漫游号码（MSRN）。VLR 把该 MS 的 MSRN 送到 HLR，并转记做 VMSC。由 VMSC 向该 VLR 查询有关的“呼叫参数”。获得成功后，再向相关的基站（BS）发出“寻呼请求”。基站控制器（BSC）根据 MS 所在的小区，确定所用的收发信台（BTS），在寻呼信道（PCH）上发送此寻呼请求信息。

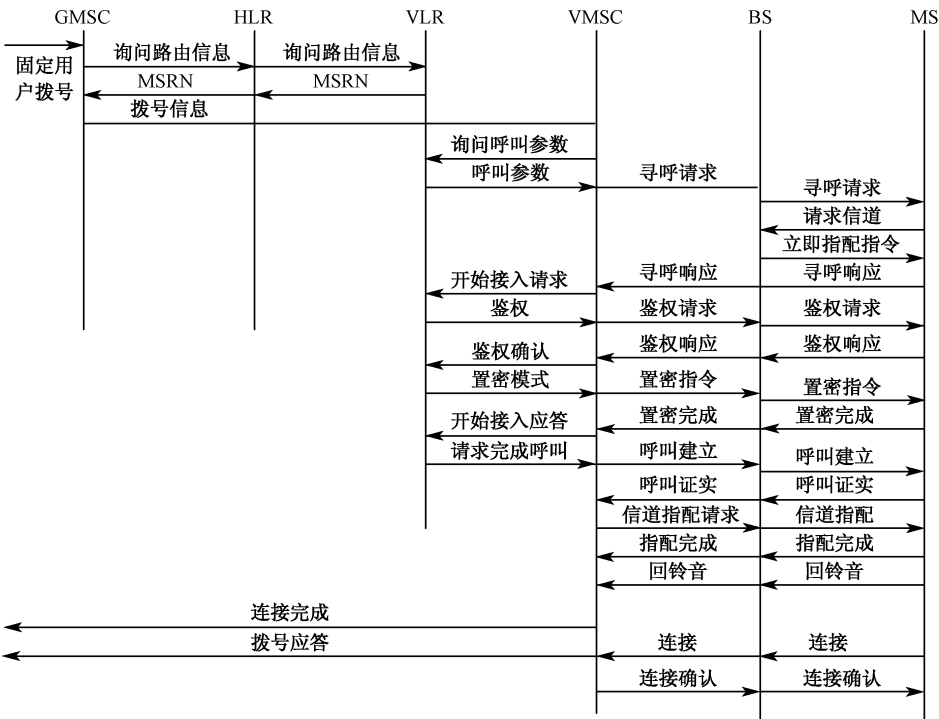


图 4-11 移动用户被叫时的接续过程

MS 收到寻呼请求信息后，在随机接入信道（RACH）向 BS 发送“信道请求”，由 BS 分

配专用控制信道（DCCH），即在公用控制信道（CCCH）上给 MS 发送“立即指配”指令。MS 利用分配到的 DCCH 与 BS 建立起信令链路，然后向 VMSC 发回“寻呼”响应。

VMSC 接到 MS 的寻呼响应后，向 VLR 发送“开始接入请求”，接着启用常规鉴权和置密模式过程。之后，VLR 即向 VMSC 发回“开始接入应答”和“完成呼叫”请求。VMSC 向 BS 及 MS 发送“呼叫建立”的信令。被叫 MS 收到此信令后，向 BS 和 VMSC 发回“呼叫证实”信息，表明 MS 已可以进入通信状态。

VMSC 收到 MS 的“呼叫证实”信息后，向 BS 发出信道“指配请求”，要求 BS 给 MS 分配无线业务信道（TCH）。接着，MS 向 BS 及 VMSC 发回“指配完成”响应和回铃音，于是 VMSC 向固定用户发送“连接完成”信息。被呼移动用户摘机时，向 VMSC 发送“连接”信息。VMSC 向主叫用户发送“拨号应答”信息，并向 MS 发送“连接”确认信息。至此，完成了固定用户呼叫移动用户的整个接续过程。

4.4.3 越区切换与漫游

所谓越区切换，是指在通话期间，当移动台从一个小小区进入另一个小小区时，网络能进行实时监控，把移动台从原来的小小区所用信道切换到新小小区的某一信道，并保证通话不间断（用户没有感觉）。

无论在模拟蜂窝系统还是在数字蜂窝系统中，越区切换都是最重要的网络控制功能。在模拟蜂窝系统中，移动台在通信时的信号强度是由周围的 BS 进行测量的，测量结果送给 MSC，由 MSC 根据这些测量数据来判断该 MS 是否需要越区切换，应该切换到哪一个小小区。一旦 MSC 认为此 MS 需要切换到一个新小小区去，即由它启动此次越区切换，一方面通知新的 BS 启动指配的空闲信道，另一方面通过原来的 BS 通知 MS 将其工作频率切换到新的信道上。这种做法需要 BS 和 MSC 之间频繁地传输测量值信息和控制信令，它不仅会增大链路负荷，而且要求 MSC 具有很强的处理能力。随着通信业务量的不断增大和小小区半径的减小，越区切换自然会越来越频繁，这种方法已经不能满足数字蜂窝网的要求。

GSM 系统采用的越区切换办法称为辅助切换（MAHO）法。其主要指导思想是把越区切换的检测和处理等功能分散到各移动台，即由移动台来测量本基站和周围基站的信号强度，把测得结果送给 MSC 进行分析和处理，从而做出有关越区切换的决策。

时分多址（TDMA）技术为移动台辅助切换法提供了条件。GSM 系统在一帧的 8 个时隙中，移动台最多占两个时隙分别进行发射和接收，在其余的时隙内，可以对周围基站的广播控制信道（BCCH）进行信号强度的测量。当移动台发现它的接收信号变弱，达不到或已经接近于信噪比的最低门限值，而又发现周围某个基站的信号很强时，它就可以发出越区切换的请求，由此来启动越区切换的过程。切换能否实现还应由 MSC 根据网中的很多测量报告做出决定。如果不能进行切换，BS 会向 MS 发出拒绝切换的指令。

越区切换主要有 3 种不同的情况，下面分别予以介绍。

1. 同一个 BSC 控制区内不同小小区之间的切换

这种切换是最简单的。首先由 MS 向 BSC 报告原基站和周围基站的信号强度，由 BSC 通知 MSC/VLR，某移动台已完成此次切换。若 MS 所在的位置区也变了，那么在呼叫完成后还需要进行位置更新。

2. 同一个 MSC/VLR 业务区内，不同 BSC 控制区的小区之间的切换

这种切换由 MSC 负责切换过程。首先由 MS 向 BSC₁ (原基站控制器) 报告测试数据，BSC₁ 向 MSC 发送“切换请求”，再由 MSC 向 BSC₂ (新的基站控制器) 发送“切换指令”，BSC₂ 向 MSC 发送“切换证实”消息。然后 MSC 向 BSC₁、MS 发送“切换指令”。待切换完成后，MSC 向 BSC₁ 发送“清除命令”，释放原占用信道。

3. 不同 MSC/VLR 控制小区之间的切换

这是一种最复杂的切换，切换中需进行很多次信息传递。切换流程如图 4-12 所示，即由 MSC₁ 向另一个新的移动交换中心 MSC₂ 转发此切换请求。请求信息中包括该移动台的标志和所要切换到的新基站 BS₂ 的标志。MSC₂ 收到后，通知其相关的 VLR₂ 给该 MS 分配切换号码，并通知新的基站 BS₂ 分配无线信道，然后向 MSC₁ 传送“切换号码”。

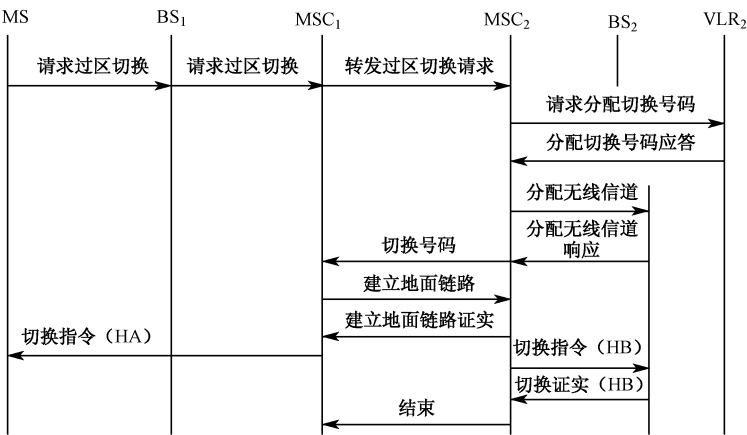


图 4-12 不同 MSC/VLR 控制小区切换流程

如果 MSC₂ 发现无空闲信道可用，即通知 MSC₁ 结束此次切换过程，这时 MS 先用的通信链路将不被拆除。

MSC₁ 收到“切换号码”后，要在 MSC₁ 和 MSC₂ 之间建立“地面有线链路”。完成后，MSC₂ 向 MSC₁ 发送“地面有线链路建立证实”信息，并向 BS₂ 发出“切换指令” (HB)。而 MSC₁ 向 MS 发送“切换指令” (HA)，MS 收到后，将其业务信道切换到新指配的业务信道上去。BS₂ 向 MSC₂ 发送“切换证实”信息 (HB)，MSC₂ 收到后向 MSC₁ 发出“结束”信息，MSC₁ 收到后，即可释放原来占用的信道，于是整个切换过程结束。

4.5 GSM 系统的安全管理

由于空中接口极易受到侵犯，GSM 系统为了保证通信安全，采取了特别的鉴权和加密措施。鉴权是为了确认移动台的合法性，而加密是为了防止第三者窃听。鉴权中心 AUC 为鉴权和加密提供了三参数组 (RAND、SRES 和 K_c)，AUC 按照如图 4-13 所示的步骤产生一个三参数组。

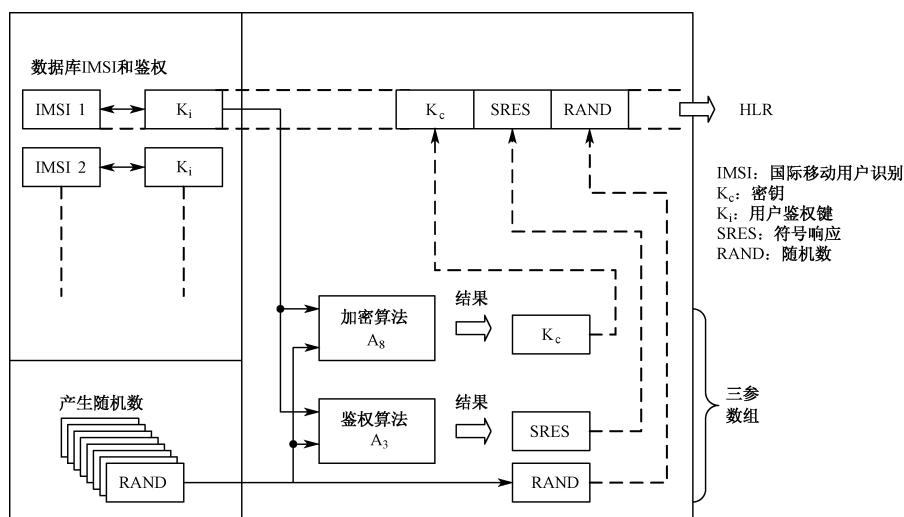


图 4-13 AUC 产生三参数组

GSM 使用存储在 AUC 和个人 SIM 卡中的机密信息来提供几种保密服务。SIM 卡存储着个人机密数据，以防 PIN 码被盗用（例如，鉴权的密钥 K_i 和加密程序都存储在 SIM 卡中）。GSM 系统中说明了 3 种算法来提供安全业务， A_3 算法用于鉴权， A_5 算法用于加密， A_8 算法用于产生密钥。

4.5.1 鉴权

GSM 系统的鉴权原理是基于 GSM 系统定义的鉴权键 K_i （也称为鉴权密钥）的。当一个客户与 GSM 网络运营商签约，进行注册登记时，就被分配一个移动用户号码（MSISDN）和一个移动用户识别号码（IMSI），与此同时还要产生一个与 IMSI 对应的移动用户鉴权键 K_i 。鉴权键 K_i 被分别存放在网络终端的鉴权中心 AUC 和移动用户的 SIM 卡中。鉴权的过程就是验证网络终端和用户端的鉴权键 K_i 是否相同，验证是在网络的 VLR 中进行的。不过这样进行鉴权存在一个问题，就是鉴权时需要用户将鉴权键在空中传输给网络，这就存在鉴权键 K_i 可能被人截获的问题。为了安全需要，GSM 用一鉴权算法 A_3 产生加密的数据，叫做符号响应（Signed Response，SRES）。具体方法是：用鉴权键 K_i 和一个由鉴权中心 AUC 中伪随机码发生器产生的伪随机数（Random Number，RAND），作为鉴权算法 A_3 的输入，经 A_3 后，其输出便是符号响应 SRES。这样在鉴权时移动用户向网络终端传送的是 SRES，并在网络的 VLR 中比较。鉴权过程主要涉及 AUC、HLR、MSC/VLR 和 MS，它们均有各自存储的与用户有关的参数。

鉴权程序如下：首先，AUC 产生鉴权三参数后，将其传送给 VLR，鉴权开始时 VLR 通过 BSS 将随机数（RAND）送给移动台的 SIM 卡。由于 SIM 卡中具有与网络端相同的 K_i 和 A_3 、 A_8 算法，所以可产生与网络相同的 SRES 和 K_c 。为了在 VLR 中进行鉴权验证，MS 要将 SIM 卡产生的 SRES 发给 VLR，以便在 VLR 中将其与网络终端的 SRES 比较，达到鉴权加密的目的。另外，因为 SRES 是随机的，所以在空中传输时是加密的。

4.5.2 加密

为了保证用户个人隐私和信息安全，在 GSM 中与用户相关的所有信息都被加密了。鉴权后，MS 和 BSS 通过密钥 K_c 来启动加密，这里需要注意 K_c 是加密安全功能函数的准确位置，BTS 和

BSC 是依赖于供应商的。使用私有密钥 K_i 经算法 A_8 产生随机数为 K_c 。MS 中的 SIM 和网络两者均是在随机数 RAND 基础之上来计算同一 K_c 。密钥 K_c 本身是不会在空中接口进行传输的。

MS 和 BTS 通过使用算法 A_5 和密钥 K_c 可以对数据进行加/解密。 K_c 应该是 64b，虽然它并不完全可靠，但至少可防止简单的窃听。下面从用户信息加密、移动设备识别和用户识别码保密 3 个方面来介绍 GSM 系统的加密过程。

1. 用户信息加密

GSM 系统为确保用户信息（语音或非语音业务）以及与用户有关的信令信息的私密性，在 BTS 与 MS 之间交换信息时，专门采用了一个加密程序，如图 4-14 所示。鉴权程序过程中，在计算 SRES 的同时，用另一个算法 A_8 计算出加密密钥 K_c ，并在 BTS 和 MSC 中暂存 K_c 。当 MSC/VLR 把加密模式命令 M 通过 BTS 发往 MS 时，MS 根据 M、 K_c 及 TDMA 帧号通过加密算法 A_5 产生一个加密消息（密文），表明 MS 已完成加密，并将加密消息回送给 BTS。BTS 采用相应的算法解密，恢复消息 M（明文），如果消息无误，则通知 MSC/VLR，表明加密模式完成。

2. 移动设备识别

每一个移动台设备均有一个唯一的移动台设备识别码（IMEI）。在 EIR 中存储了所有移动台的设备识别码，每一个移动台只存储本身的 IMEI。设备识别的目的是确保系统中使用的设备不被盗用或为非法的设备，为此，EIR 中使用 3 种设备清单。

白名单：合法的移动设备识别号；

黑名单：禁止使用的移动设备识别号；

灰名单：是否允许使用由运营者决定，如有故障或未经型号认证的移动设备识别号。

设备识别是在呼叫建立尝试阶段进行的。例如，当 MS 发起呼叫时，MSC/VLR 要求 MS 发送其移动台设备识别码，MSC/VLR 收到后，与存储在 EIR 中的名单进行核对，根据核对结果决定是继续还是停止呼叫建立程序。

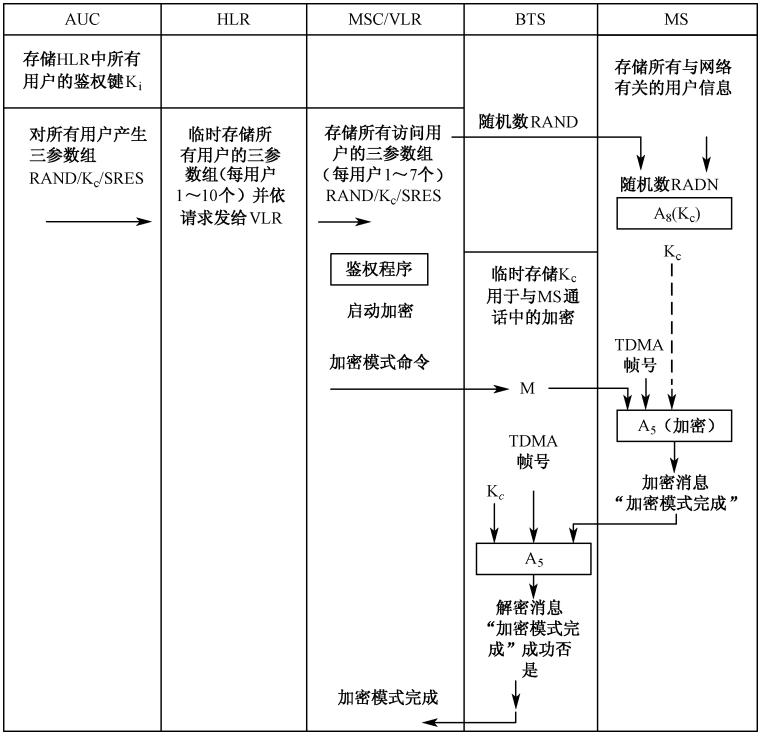


图 4-14 加密程序

3. 用户识别码保密

为了防止非法监听继而盗用用户识别码 (IMSI), 当无线链路上需要传送 IMSI 时, 均用临时移动用户识别码 TMSI 代替 IMSI。只有在位置更新失败或移动台得不到临时移动用户识别码时才使用 IMSI。

移动台每次向系统提出一种请求, 如位置更新、呼叫尝试等, MSC/VLR 将给 MS 分配一个新的 TMSI。

由上述分析可知, IMSI 是唯一且不变的, 但是 TMSI 是不断更新的。在无线信道上传送的一般是临时移动用户识别码 TMSI, 从而确保用户识别码 IMSI 的安全性。

4.6

通用分组无线业务

在 GSM 系统中, 每个 TDMA 时隙只能提供 9.6kbps 的传输速率, 不能满足人们对高速无线数据传输业务的需求, 如 Internet 业务需求的高速增长。GSM 推出了两种高速移动业务数据: HSCSD (高速电路交换数据) 和 GPRS (通用分组无线业务)。

4.6.1 高速电路交换数据的概念

GSM 数据传输能力的直接提高, 是因为采用高速电路交换数据 (High Speed Circuit Switched Data, HSCSD), 它采用了无线链路的多时隙技术。在常规 GSM 语音及数据通信中, 每信道占 200kHz 带宽 8 个时隙中的一个, 而 HSCSD 则同时利用多个时隙建立链路, MS 从 GSM 网络中申请一个或多个业务信道, 也就是说, 在一个 TDMA 帧中分配多个 TDMA 时隙, 每个时隙数据传输速率可由 9.6kbps 提高到 14.4kbps。如使用 4 个 TDMA 时隙, HSCSD 的传输速率可达 57.6kbps。这种分配可能是非对称的, 也就是说下行链路要比上行链路分配到更多的时隙, 这适合于用户下载数据比上传多的情况。一般来说 HSCSD 业务的实现比较简单, 它只需对无线链路协议做一些修改, 而不需要对核心网络进行改造, 因此其系统改造费用也比较低。

尽管看起来很吸引人, 但是 HSCSD 也有一些主要的缺点。它仍然使用 GSM 面向连接的机制, 而这对于计算机数据业务来说并不是有效的, 因为计算机数据业务常常是突发的和非对称的。虽然下载较大的文件需要使用所有保留的信道, 但典型的网页浏览中大部分时间信道是空闲的。信道的分配直接反映在业务费用中, 一旦信道被预留, 其他的用户就不能再使用。另外, 使用 n 个信道的 HSCSD 在切换、建立连接和释放过程中需要发 n 次信令, 每一个信道分别进行处理。在这种情况下, BSC 必须检查 n 个信道中的资源, 而不仅仅是一个信道, 所以在切换时阻塞的可能性或服务质量的降低的概率将增加。总而言之, HSCSD 在满足更高带宽和相对恒定话务量方面可能是一种很好的过渡方法。然而, 假如要向用户所分配的每一个通信信道都收费的话, 那么对于突发的 Internet 业务也就没什么重大意义了。

4.6.2 通用分组无线业务简介

为了避免 HSCSD 的问题, 趋于更加灵活和有效的数据传输, 可采用完全面向分组的方法。通用分组无线业务 (GPRS) 是 GSM Phase 2.1 规范实现的内容之一, 它的目标是提供高达 115.2kbps 速率的分组数据业务。GPRS 应用与 LAN 原理相同, 仅在实际传送和接收时才使用无线资源。使用 GPRS, 在一个小区内, 上百个用户可以分享同一带宽, 多个用户共享一条无

线信道，多个用户将数据分组打包在信道中传送。这样，用户既可以同时通信，又可以大大提高信道利用率。GPRS 的另外一个优点是资费的合理性，用户只需按数据通信量付费即可，而不是像电路交换方式那样需对整个链路占用时间付费。

1. GPRS 网络结构

将现有的 GSM 网络改造成能提供 GPRS 业务的网络，需要增加两个主要单元：SGSN（GPRS 服务支持节点）和 GGSN（GPRS 网关支持节点）。SGSN 的工作是对移动终端进行定位和跟踪，并发送和接收移动终端的分组。GGSN 将 SGSN 发送和接收的 GSM 分组，按照其他分组协议（如 IP）发送到其他网络。GPRS 网络的逻辑结构如图 4-15 所示。

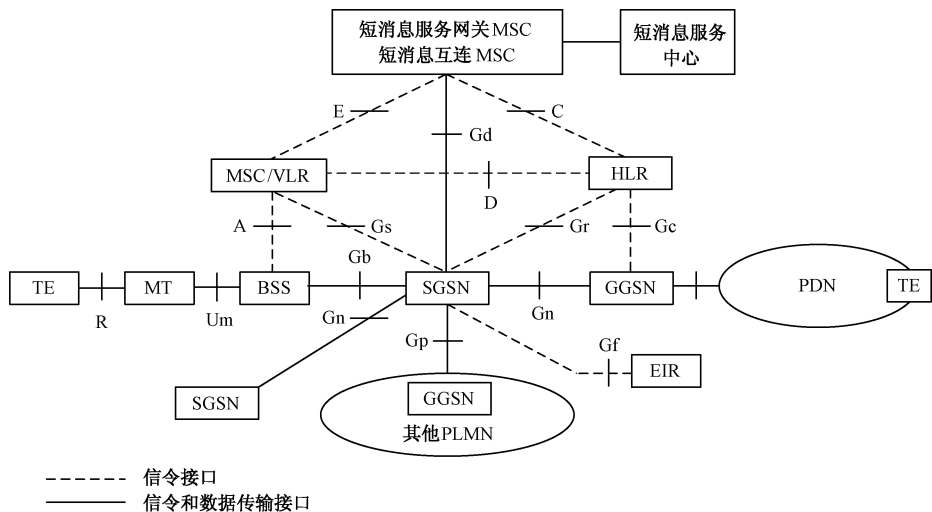


图 4-15 GPRS 网络的逻辑结构

SGSN 是 GPRS 网的主要设备，它负责分组的路由选择和传输，在其服务区内负责将分组递送给移动台，它是为 GPRS 移动台构建的 GPRS 网的服务访问点。当高层的协议数据单元（PDU）要在不同的 GPRS 网络间传递时，源 SGSN 负责将 PDU 进行封装，目的 SGSN 负责解封装和还原 PDU。在 SGSN 之间采用 IP 协议作为骨干网传输协议，整个分组的传输过程采用 Tunneling（隧道）协议。GGSN 也维护相关的路由信息，以便将 PDU 同构隧道传送到正在为移动台服务的 SGSN。SGSN 完成路由和数据传输所需的与 GPRS 用户相关的信息均存储在 HLR 中。

SGSN 还有许多功能，例如处理移动管理和进行鉴权操作，并且具有注册功能。SGSN 连接到 BSC，处理从主网使用的 IP 协议到在 SGSN 和 MS 之间使用的 SMDCP 和 LLC 的协议转换，包括处理压缩和编码的功能。SGSN 也处理 GPRS 移动用户的认证，且当认证成功时，SGSN 处理 MS 到 GPRS 网的注册并处理它的移动管理。如果 MS 想发送数据到外部网络或从外部网络接收数据，SGSN 在 SGSN 和相关的 GGSN 之间转发数据。

GGSN 像互联网和 X.25 一样，用于和外部网络的连接。从外部网络的角度看，GGSN 是到子网的路由器，因为 GGSN 对外部网络隐藏了 GPRS 的结构。当 GGSN 接收到地址为一个特定的移动用户的数据时，GGSN 检查这个地址是否处于激活状态。如果处于激活状态，GGSN 就转发数据到相应的 SGSN；如果不是激活状态，则将数据丢弃。由移动台发出的分组被 GGSN 发送到目的网络。

在 GPRS 网络中，对 HLR 进行了升级，使其包含了 GPRS 用户数据信息。SGSN 通过 Gr 结构可以访问 HLR，GGSN 通过 Gc 接口可以访问 HLR。MSC/VLR 功能也得到了强化，SGSN

通过 Gs 接口可以访问 VLR，从而更好地调和非 GPRS 之间的服务和功能。为了能在 GPRS 网中提供 SMS（短消息服务），SMS-GMSC（支持短消息服务的网关 MSC）和 SMS-IWMSC（支持短消息服务的互连 MSC）的功能也得到了加强，SGSN 通过 Gd 接口可以访问 SMS-GMSC 和 SMS-IWMSC。

2. GPRS 协议

为了与 SGSN 进行互连，基站子系统（BSS）把无线接口升级为增强版的链路层协议（包括无线路由控制（RLC）/多址接入控制（MAC）协议），使得用户能复用相同的物理资源。BSS 在数据发送或接收时分配资源给用户，随后还会重新分配。BSS GPRS 协议（BSSGP）提供了一个在 BSS 和一个 SGSN 之间传输用户数据所必需的无线相关的 QoS（服务质量）和路由信息。BSS 与 SGSN 之间的接口为 Gb。

一个简单的 GPRS 网络之间的路由过程如图 4-16 所示，源移动台的 SGSN 封装移动台 MS 分组，并将分组路由到合适的 GGSN-S。基于分组中的目的地址，分组通过分组数据网被传送到目的 GGSN-D。GGSN-D 检测与目的地址相关的路由信息，确定服务目的用户的 SGSN-D 并确定相关的隧道协议，将分组封装后传送给 SGSN-D，SGSN-D 最后将分组传送给目的移动用户。

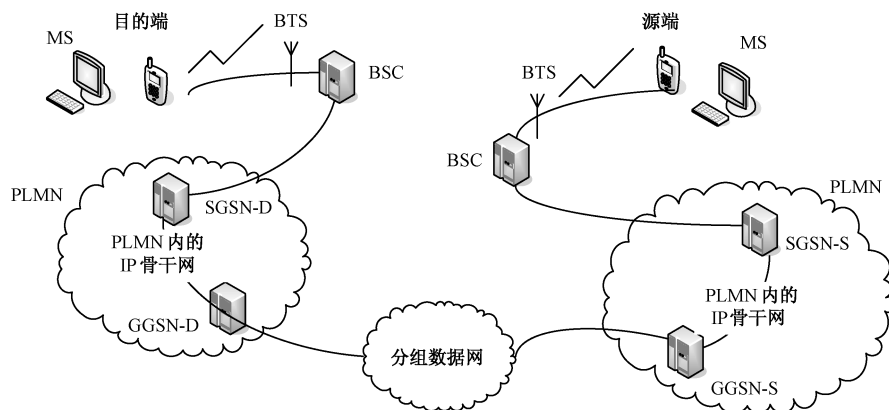


图 4-16 简单的 GPRS 网络之间的路由过程

4.7

习题

1. 填空题

- (1) GSM 各分系统之间或各分系统与各种公用通信网之间都有明确和详细的标准化接口规范，可与各种公用通信网如_____、_____、_____等互连互通。
- (2) GSM 蜂窝系统的主要组成部分为_____、_____和_____。
- (3) 移动台的一个重要组成部分是_____，也叫做 SIM 卡。
- (4) 网络子系统对 GSM 移动用户之间的移动通信和移动用户与其他通信网用户之间起着管理作用。主要功能包括：_____、_____与_____等。
- (5) GSM 的基本业务按其功能可以分为_____和_____，这两种业务是独立的通信业务。
- (6) 在 GSM 系统中，交织编码器的输入码流是_____ms 的帧，每帧有_____b。将每两帧

组成一个_____的矩阵,按_____写入、_____读出的顺序进行交织。

2. 是非判断题(正确画√, 错误画×)

(1) 数字蜂窝移动通信是在模拟蜂窝移动通信的基础上发展起来的,在网络组成、设备配置、网络功能和工作方式上,二者都有相同之处。()

(2) 在实际的 GSM 通信网络中,虽然网络规模不同、运营环境不同,但是网络的配置方法都相同。()

(3) 移动性管理包含如下功能:位置登记、鉴权、识别、位置更新、提供临时移动用户识别码等。()

(4) 在模拟蜂窝系统中,移动台在通信时的信号强度是由移动台自身进行测量的。()

3. 选择题(将正确答案的序号填入括号内)

(1) 一个移动交换中心 MSC 可以管理多达()个基站控制器 BSC,一个基站控制器最多可以控制()个基站收发信机。

- A. 几十, 256 B. 上百, 256 C. 几十, 64 D. 上百, 64

(2) GSM 系统在一帧的 8 个时隙中,移动台最多占()个时隙分别进行发射和接收,在其余的时隙内对周围基站的广播控制信道进行信号强度的测量。

- A. 2 个 B. 3 个 C. 4 个 D. 5 个

(3) 移动台的不断运动将导致其位置的不断变化。这种变化的位置信息由()寄存器进行登记。

- A. HLR B. VLR C. AUC D. EIR

(4) GSM 的空中接口是()接口。

- A. A 接口 B. Abis 接口 C. Um 接口 D. B 接口

4. 简答题

(1) GSM 系统的主要特点有哪些?

(2) 简述 GSM 系统的主要业务。

(3) 简述移动用户主叫固定用户的主要过程。

(4) 简述 GSM 系统越区切换 3 种不同的情况。

(5) 简要描述 GSM 系统各个部分之间的接口及其功能。

(6) GSM 系统在通信安全性方面采取了哪些措施? 简述其过程。

(7) GPRS 系统在 GSM 系统的基础上增加了哪些功能单元? 基于电路交换的 GSM 网络与基于分组交换的 GPRS 网络传输用户信息的过程有何不同?

5. 画图题

画出 GSM 系统体系结构的主要部分, 并且描述它们的功能。

调研项目: GSM 组网技术的发展与现状



调研目的:

1. 通过调研, 了解我国 GSM 组网的总体发展过程及现状。

2. 了解目前我国 GSM 工程项目有哪些,在项目管理中需要注意哪些问题。
3. 增强对 GSM 组网技术的认识,提高读者学习移动通信技术的积极性,了解目前 GSM 组网技术在移动通信中的地位和作用。



调研要求:

1. 在调研的基础上,要按统一要求格式撰写 5 000 字左右的《关于我国 GSM 组网技术的发展过程及现状》调查研究报告。
2. 调研资料要真实、可靠,论证要清晰、准确。报告中,在简述我国移动通信技术的发展历程的基础上,重点阐述当前我国移动通信中 GSM 网络的技术和应用,最后简要介绍其发展趋势。



提示:

可利用图书馆、互联网等查阅有关资料,在有条件的情况下,可到有关运营商处进行调研。

>>> 实验 4 GPRS 模块主叫通话实验



实验目的:

1. 了解 GPRS 基本原理。
2. 了解 GPRS 无线通信模块(又称 GPRS MODEM 或 GSM/GPRS 模块)的基本知识。
3. 了解 AT 指令基本知识。
4. 掌握 GPRS 无线通信模块的使用。









实验方法:

1. 课前仔细阅读实验指导书,熟悉 GPRS 模块工作原理,了解有关测量仪器的使用方法。
2. 根据实验指导书的说明,结合实验设备,在老师的指导下,通过对 GPRS 模块输入 AT 指令实现 GPRS 模块的主叫通话。
3. 注意实验过程中观察到的现象,做好记录,并进行分析。

>>> 第5章

CDMA 移动通信系统

-  5.1 CDMA 概述
-  5.2 CDMA 的基本原理
-  5.3 CDMA 功率控制及软切换技术
-  5.4 CDMA 系统信道结构
-  5.5 CDMA 系统的主要业务
-  5.6 习题

1993 年 7 月，美国 Qualcomm 公司开发的 CDMA 蜂窝体制，被采纳为北美数字蜂窝标准，定名为 IS-95，即窄带码分多址（N-CDMA）蜂窝移动通信系统。随后，世界上许多国家纷纷跟进、引入、研制，并迅速进入实用化和商业化阶段，使得 CDMA 蜂窝移动通信系统在 20 世纪 90 年代得以迅速崛起。目前，CDMA 技术已经成为第三代蜂窝移动通信标准的无线接入技术。

5.1 CDMA 概述

CDMA 蜂窝移动通信系统以扩频码分多址技术为基础，具有抗多径干扰、抗衰落、保密性好、系统容量大等一系列优点，其优势得到了人们的公认，并成功地应用到第二代和第三代蜂窝移动通信系统中。

5.1.1 CDMA 的发展

20 世纪 80 年代，随着国际上移动通信技术的迅速发展，许多国家纷纷把目光投向了数字蜂窝移动通信系统，并制定了第二代蜂窝网的技术要求。在大量蜂窝移动通信工业部门的大力支持下，由美国圣地亚哥的 Qualcomm 公司设计、开发的 CDMA 蜂窝网于 1991 年 12 月进行了现场试验，并取得了一致好评。

1993 年 3 月，CDMA 公共空中接口标准（IS-95）得以制定。

1993 年 7 月，美国电信工业协会通过 IS-95 标准，并正式颁布。随后又陆续颁布了一系列 CDMA 标准。

韩国邮电部于 1993 年 4 月决定正式采用 CDMA 蜂窝移动通信系统, 购买了 Q-CDMA 生产许可证。1996 年韩国自己生产的 CDMA 系统设备大规模投入商用。

中国于 1993 年开展 CDMA 蜂窝技术研究, 1994 年 3 月, 中国开始引进 CDMA 试验网, 并在北京、上海等多个城市进行试验网建设。1998 年长城 CDMA 商用试验网率先在北京、上海、西安建成, 并投入商用。这为快速发展 CDMA 经营规模提供了有利条件。

21 世纪初, 中国在 CDMA 技术上取得了多项突破, 国产 CDMA 手机陆续投放市场, CDMA 用户大幅度增加。联通 CDMA 网络的建成, 为 3G 网络在中国的发展奠定了基础。在全球, 窄带 CDMA 网络逐渐向 3G 网络过渡并商业化。

2009 年, 中国移动、中国联通和中国电信 3 大运营商取得 3G 牌照, 进行网络建设和商业化。

5.1.2 CDMA 的特点

同 FDMA 和 TDMA 相比, CDMA 有自己独特的特点。

1. 采用不同码型区分不同用户

在 CDMA 系统中, 传输信息信号不是靠频率不同或时隙不同来区分不同用户的, 而是靠不同的编码序列来区分, 也就是说, 是靠信号的不同波形来区分不同的用户。如果从时域或频域来看, 多个 CDMA 信号是互相重叠的。接收机用相关器从多个 CDMA 信号中选出预定码型的信号。在 CDMA 蜂窝移动通信系统中, 可采用频分双工 (FDD) 或时分双工 (TDD) 来进行正向信道和反向信道的信号传输, 但无论传输何种信息, 都采用不同码型区分彼此。

2. 系统容量大而且可变

从理论上分析, 在使用相同频率资源的情况下, CDMA 移动通信网的容量是模拟网容量的 20 倍, 实际应用中也比模拟网大 10 倍左右, 比 GSM 网大 4~5 倍。而且由于 CDMA 蜂窝通信系统的全部用户共享一个无线信道, 用户的区分只靠所用码型的不同。因此, 当蜂窝网的负荷满载时, 增加少数用户只会相当于增加背景噪声, 造成语音质量的轻微下降, 而不会出现阻塞现象。可见, CDMA 蜂窝通信系统具有“软容量”或“软过载”特性, 在业务高峰期间, 可通过稍微降低系统的误码性能, 就可以适当增加系统的用户数目。另外, CDMA 蜂窝通信系统可以充分利用人类语音的不连续特性来实现语音激活技术, 提高系统的通信容量。

3. 采用软切换技术, 通话质量更佳

CDMA 采用软切换技术, 保证了越区切换的可靠性, 完全克服了硬切换容易掉话的缺点, 使得掉话现象明显减少。CDMA 系统的语音编码器可动态地调整数据传输速率, 并根据适当的门限值来选择不同的电平级发射, 而且门限值可以根据背景噪声的改变而改变, 使得在背景噪声较大的情况下, 也可以得到较好的通话质量。

4. 频率划分简单, 建网成本低

CDMA 用户按照不同的码序列进行划分, 所以不同频率的 CDMA 载波可以在相邻的小区使用, 网络规划灵活, 扩展简单。由于 CDMA 网络覆盖范围大, 系统容量高, 所需基站少, 降低了建网成本。

5. 优良的抗干扰、抗多径衰落和保密性能

CDMA 蜂窝移动通信系统以扩频通信为基础, 具有扩频通信系统所固有的优点, 例如具有极强的抗人为干扰和抗多径衰落能力, 这对移动通信非常有利。另外, 扩频信号的频谱结构

与待传输的信息无关,主要由扩频码来决定。信息的隐蔽程度或安全程度取决于所使用的扩频码。由于扩频通信系统可以使用周期很长的伪随机码,经过它调制后的数字信息类似于随机噪声,将其用于保密通信系统中,不易被敌方发现和识辨。而且由于扩频信号的功率谱密度很低,侦查接收机难以检测,降低了系统的截获概率,提高了系统的保密性能。

5.1.3 CDMA 移动通信系统的基本特性

1. 时间基准

在 CDMA 数字蜂窝通信系统中,全网必须具有统一的时间基准。这种统一而精确的时间基准,对 CDMA 蜂窝通信系统来说尤为重要。

CDMA 蜂窝移动通信系统采用“全球定位系统(GPS)”的时间基准,GPS 的时间和“世界协调时间(Coordinated Universal Time, UTC)”是同步的,二者之差是秒的整数倍。

各个基站都配有 GPS 接收机,保证系统中各基站的时间基准统一,这个基准称为 CDMA 系统的公共时间基准。移动台的载频和时间同步时,采用导频信号、同步信道进行。移动台通常利用一条最先到达,并用于解调的多径信号分量建立基准,如果另一条多径分量变成了最先到达,并用于解调的多径分量,则移动台的时间基准要跟踪到这个新的多径分量。

2. 工作频率和信道数的安排

移动台向基站的传输上行链路频段为 824~849MHz,基站向移动台的传输下行链路频段为 869~894MHz。每一个载频分为 64 个码分信道,每一个小区可以分为 3 个扇形区,可共用一个载频,每一个网络可分为 9 个载频,其中收、发各占 12.5MHz,共计 25MHz。CDMA 蜂窝系统每个载频占用的频段为 1.25MHz 带宽,不同的 CDMA 蜂窝系统可采用不同的载频划分,但对同一个 DS-CDMA 蜂窝系统的某一个载频来说,则采用不同码型选择站址,即对不同的小区和扇区基站分配不同的码型。

5.2

CDMA 的基本原理

传统的模拟无线通信一般采用调频(FM)和调幅(AM)两种方式,不能适应高速数据通信的要求。进入 20 世纪 80 年代后,数字无线数据通信方式成为主流,其调制方式有振幅键控(ASK)、移频键控(FSK)和相移键控(PSK),其优势是便于采用先进的数字信号处理技术,如均衡技术、编码技术等,提高了数据传输速率和传输的可靠性。实际的系统如 GSM、IS-54 等也存在一些缺陷:一方面,由于无线通信信道的开放性,通信环境不可避免地存在各种各样的突发干扰,使信号传输的可靠性降低,同时,信道的时域和频域选择性衰落,使数据传输速率的提高受到限制;另一方面,随着无线业务的快速增长,要求无线网络具备相当的灵活性,以适应业务的发展变化。这些都是常规的无线数字通信难以解决的。这些因素促成了对采用新技术的需求,以便提高数据传输速率,并进一步提高信息传输的可靠性。

5.2.1 扩频通信的基本原理

传统调制技术的设计思想是使传输带宽最小化,其目的是提高频带利用率。然而,由于带宽是一个有限的资源,为了传输更多的信息,只有压缩信息本身的带宽,而这样是以损失信噪

比为代价的。于是,调制技术又向着相反的方向发展,即采用宽带调制技术,即以信息带宽来换取信噪比的改善。扩频技术是以香农定理为基础,以信息带宽来换取信噪比改善的一种宽带调制技术,也是 CDMA 的基础,近年来发展迅速,得到了越来越广泛的应用。

1. 扩频技术

扩频 (Spread Spectrum) 传输是指:用来传输信息的信号带宽远远大于信息本身带宽的一种传输方式,频带的扩展由独立于信息的扩展码来实现,与所传信息数据无关,在接收端用同步接收来实现解扩和数据恢复,扩展频谱通信系统将待传输信息的频谱用某个特定的扩频函数(与待传输的信息码无关)扩展后成为宽频带信号,送入信道中传输,再利用相应的手段将其压缩,从而获取传输信息的通信系统。简单地说,扩频通信就是把所要传输的信号带宽扩展到很宽的频带中进行传输。在传输同样信息时所需要的射频带宽远远超过被传输信息所必需的最小带宽。扩频后射频信号的带宽至少是信息带宽的几十倍、几百倍甚至几万倍。举一个例子,在 CDMA2000-1x 系统中,把一个信息速率为 9.6kbps 的二进制比特流利用扩频通信传输,带宽可达 1.228 8MHz。也就是说,在传输同样信息时所需要的射频带宽远远超过被传输信息所必需的最小带宽。信息已不再是决定射频信号带宽的一个重要因素,射频信号带宽主要由扩频函数来决定。

2. 扩频通信系统的主要特征

扩频通信系统有以下两个主要特征:

- (1) 传输信号的带宽远远大于被传输的原始信息信号的带宽;
 - (2) 传输信号的带宽主要由扩频函数决定,此扩频函数通常是伪随机(伪噪声)编码信号。
- 以上两个特点有时也称为判断扩频通信系统的准则。

扩频通信系统最大的特点是其具有很强的抗人为干扰、抗窄带干扰、抗多径干扰的能力,其理论基础是香农定理,即

$$C = W \log_2 (1 + S/N) \quad (5-1)$$

式中, C 为信道容量 (bps); N 为平均噪声功率; W 为信道带宽 (Hz); S 为信号功率。

由式 (5-1) 可以看出,对于任意给定的信噪比 S/N ,只要增加用于传输信息的带宽 W ,理论上就可以增加在信道中无误差传输的信道容量 C 。或者说在信道中,当传输系统的信噪比 S/N 下降时,可以用增加系统传输带宽 W 的办法来保持信道容量 C 不变,即可以用增大系统的传输带宽来获得较低的信息差错率。扩频通信系统正是利用这一原理,用高速率的扩频码来达到扩展待传输的数字信息带宽的目的。由于扩频通信系统的带宽比常规通信体制大得多,所以在相同信噪比条件下,具有较强的抗干扰能力。

5.2.2 常用的扩频方法

常用的扩频信号有 3 类,即跳频信号、直接序列扩频信号(直扩信号)和跳时扩频信号。

1. 跳频扩频 (FHSS)

FH-CDMA 系统是以 FHSS 技术为基础的。在 FHSS 技术中,信息信号用看似随机的无线频率序列进行传播,并在固定间隔内从一个频率跳到另一个频率,而移动设备的接收器在接收消息时也与发送端同步地从一个频率跳到另一个频率。假定若干信道分配了跳频信号,通常有 2^n (n 为正整数) 个载波频率组成 2^n 个信道。一个跳频信号的例子如图 5-1 所示,图 5-1 (a) 表示分配的 8 个信道,即 $f_1 \sim f_8$; 图 5-1 (b) 表示在固定的时间间隔内,每个时间间隔内使用的频率是跳跃的,图中所示的信道使用顺序为: $f_7 \rightarrow f_5 \rightarrow f_3 \rightarrow f_8 \rightarrow f_1 \rightarrow f_2 \rightarrow f_6 \rightarrow f_4$ 。

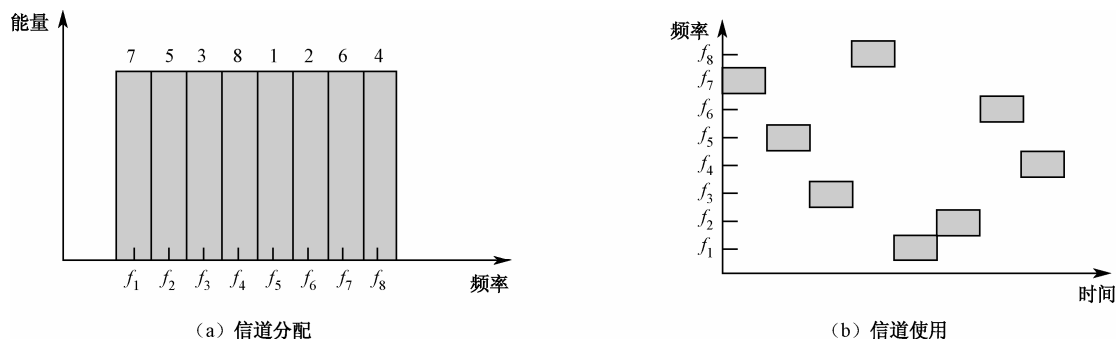


图 5-1 跳频方法示意图

FHSS 系统的原理方框图如图 5-2 所示, 为了进行传输, 如图 5-2 (a) 所示, 二进制数据被输入一个调制器, 这个调制器使用某种编码机制, 如频移键控 (FSK)。经调制后得到的信号 $S_d(t)$ 以某个基本频率为中心频率, 伪噪声 (PN) 或伪随机数 (扩展码) 生成源将作为一张频率 (信道) 表的索引而存在。 2^n 个载波频率中的每一个频率对应伪随机数生成源中 n 个位指定。在每个连续的时间间隔中, 都要从频率表中选取一个新的载波频率 $c(t)$ 。然后用由初始调制器产生的信号 $S_d(t)$ 对这一频率进行调制, 生成一个新的信号 $S(t)$, 这个信号的波形不变, 但却以被选的载波频率为中心。在接收时, 如图 5-2 (b) 所示, 扩频信号先用伪随机数生成源导出的信道表中相同的序列进行解调, 然后再解调生成数据。

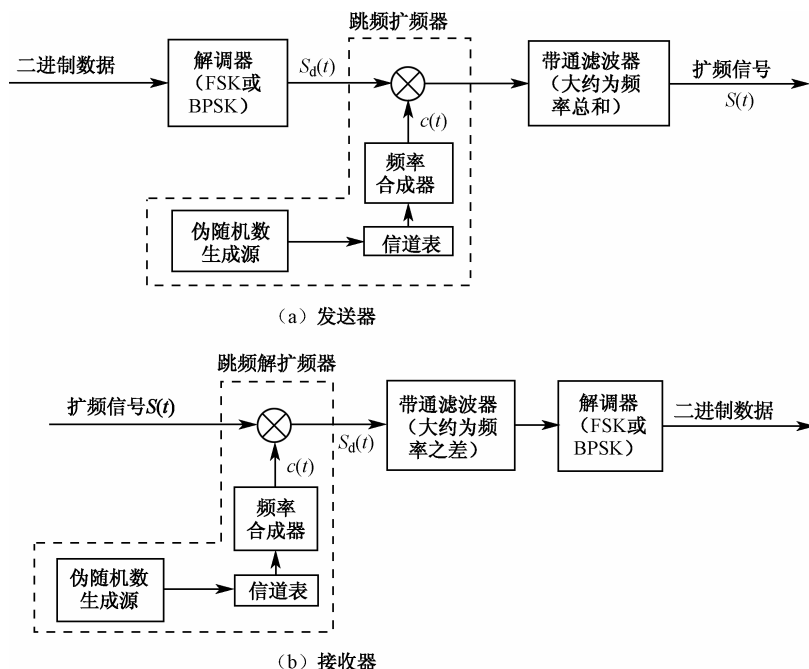


图 5-2 FHSS 系统的原理方框图

载波频率之间的间隙及每个信道的宽度通常与输入信号的带宽相对应。发送器在某一时刻以固定时间间隔 (如 300ms) 工作在一个信道上。在这一间隔期间, 一些位数 (也可能是 1 位的一部分) 采用某种编码传输机制传输, 所使用的信道顺序通过一个扩展代码来指示, 发送器和接收器使用相同的代码同步地调入某一个信道序列中。

在 FH-CDMA 系统中, 每个用户根据各自的伪随机 (PN) 序列, 动态改变其已调信号的中心频率, 如图 5-3 (a) 所示。各用户的中心频率可在给定的系统带宽内随机变化, 该系统带宽通常比各用户已调信号的带宽要宽得多。FH-CDMA 类似于 FDMA, 但频道是动态变化的。FH-CDMA 中各用户使用的频率要求相互正交 (或准正交), 即在一个 PN 序列周期对应时间区间内, 各用户使用的频率在任意时刻都不相同 (或相同的概率非常小)。

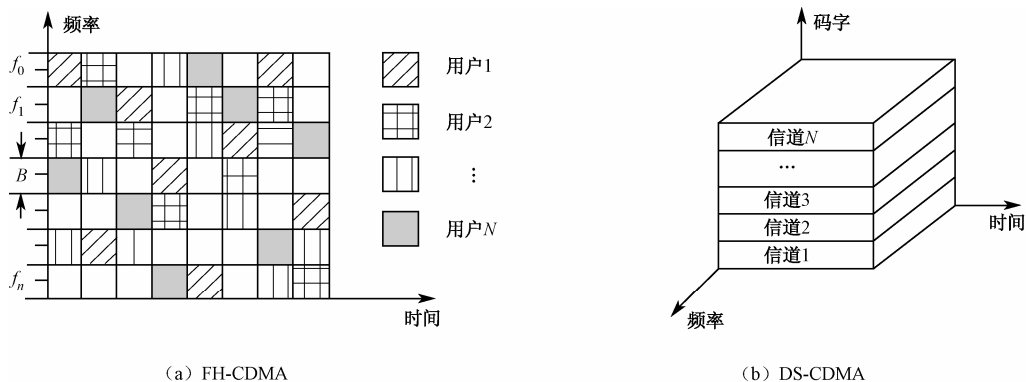


图 5-3 FH-CDMA 和 DS-CDMA 示意图

2. 直接序列扩频 (DSSS)

使用直扩序列技术 (DSSS), 原始信号中的每一位在传输信号中以多个位表示, 此技术使用了扩展编码技术, 这种扩展编码将信号扩展到更宽的频带范围上, 而这个频带范围与使用的位数成正比。例如, 一个 10 位扩展编码能够在一个频带上扩展的带宽将比用 1 位扩展编码扩展的带宽大 10 倍。

在 DS-CDMA 系统中, 所有用户工作在相同的中心频率上, 如图 5-3 (b) 所示, 输入数据序列与 PN 序列相乘得到宽带信号。不同的用户 (信道) 使用不同的 PN 序列。这些 PN 序列相互正交, 从而可像 FDMA 和 TDMA 系统中利用频率和时隙区分不同用户一样, 利用 PN 序列来区分不同用户。在 DS-CDMA 系统中, 既可以利用完全正交的码序列来区分信道, 也可以用准正交的 PN 序列来区分不同的信道。

3. 跳时扩频 (THSS)

时间跳变也是一种扩展频谱技术, 跳时扩频通信系统是时间跳变扩展频谱通信系统的简称, 主要用于时分多址 (TDMA) 通信。与跳频相似, 跳时是使发射信号在时间轴上跳变。先把时间轴分成许多时片, 在一帧内哪个时片发射信号由扩频码序列去进行控制。因此, 可以把跳时理解为用一定码序列进行选择的多时片的时移键控。由于采用了很窄的时片去发送信号, 相对说来, 信号的频谱也就展宽了。跳时扩频系统的原理方框图如图 5-4 所示, 在发送端, 输入的数据先用存储器存储起来, 由扩频码发生器产生的扩频码序列去控制开关的通断, 经二相或四相调制后再经射频调制后发射。在接收端, 当接收机的伪码发生器与发送端同步时, 所需信号就能每次按时通过控制门进入解调器。解调后的数据也经过一个缓冲存储器, 以便恢复原来的持续时间, 提供给用户均匀的数据流。只要收发两端在时间上严格同步进行, 就能正确地恢复原始数据。

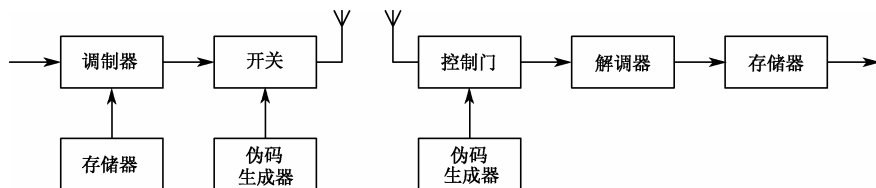


图 5-4 跳时扩频系统的原理方框图

跳时系统也可以看成一种时分系统，不同之处在于它不是在一帧中固定分配一定位置的时片，而是由扩频码序列控制，按一定规律跳变位置的时片。

跳时系统能够用时间的合理分配来避开附近发射机的强干扰，是一种理想的多址技术。但当同一信道中有许多跳时信号工作时，某一时隙可能有几个信号相互重叠。因此，跳时系统也和跳频系统一样，必须采用纠错编码，或采用协调方式构成时分多址。由于简单的跳时抗干扰性不强，很少单独使用。跳时通常都与其他方式结合使用，组成各种混合方式。

从抑制干扰的角度来看，跳时系统得益甚少，其优点在于减少了工作时间的占空比。一个干扰发射机为取得干扰效果，就必须连续发射，因为干扰机不易侦破跳时系统所使用的伪码参数。跳时系统的主要缺点是对定时的要求太严。

以上几种基本的扩展频谱通信系统各有优缺点，单独使用其中一种系统时，有时难以满足要求，将以上几种扩频方法结合起来，就构成了混合扩频通信系统。

常见的有频率跳变/直接序列混合系统（FH/DS）、直接序列/时间跳变混合系统（DS/TH）、频率跳变/时间跳变混合系统（FH/TH）等。它们比单一的扩频、跳频、跳时体制有更优良的性能。

5.2.3 扩频通信的优点

扩频通信技术是一种具有优异抗干扰性能的新技术，它有许多优点，主要表现为如下。

1. 抗干扰性能好

扩频通信具有极强的抗人为宽带干扰、窄带瞄准式干扰、中继转发式干扰的能力，有利于电子反对抗，特别适合在军事通信系统中运用。相对于常规通信系统，DS-SS、FH-SS、DS/FH、DS/TH 等系统对多径干扰不敏感，如果再采用自适应对消、自适应天线、自适应滤波等技术或措施，可以使多径干扰消除，这对移动通信是很有利的。

2. 选择性寻址能力强

可以用码分多址的方式来组成多址通信网。多址通信网内的所有接收机和发射机可以同时使用相同的频率工作。对于给定的接收机，当指定了特定的扩频码后，该接收机就只能与使用相同扩频码的发射机相联系。当网内所有的接收机都指定了不同的扩频码后，网内的任一发射机可通过选择不同的扩频码来和使用相应扩频码的接收机相联系。使用扩频通信技术组成多址通信网时，网络的同步比常规通信体制易于实现，便于实现机动灵活的随机接入，便于采用计算机进行信息的控制和交换。

3. 保密性能好

扩频信号的频谱结构基本与待传输的信息无关，主要由扩频码来决定。信息的隐蔽程度或安全程度取决于所使用的扩频码。由于扩频通信系统使用码周期很长的伪随机码，在一个伪码周期中具有随机特性，经过它调制后的数字信息类似于随机噪声，因而将其用于保密通信系统中，敌方采用普通侦察手段和破译方法不易发现和识辨信号。

扩频信号的功率相当均匀地分布在很宽的频率范围内,所以被传输的功率谱密度很低,侦察接收机难以检测,使得系统具有低的截获概率,从而提高了系统的保密性能。

4. 频谱密度低,对其他通信系统的干扰小

在输出信号功率相同的情况下,由于扩频信号扩展了频带,降低了输出信号单位频带内的功率(能量),从而降低了系统在单位频带内电波的通量密度。频谱密度低,对空间通信大有好处。当空间通信系统在地面上产生的电波通量密度太大时,会造成对地面通信系统的干扰。对于当前无线电通信中频率资源匮乏的问题,利用扩频通信技术,使频率资源可重复利用。使用扩频码分多址技术,可解决常规通信系统中电波拥挤的大难题。所以扩频码分多址通信在城市移动通信中有着广阔的应用前景。

5. 高分辨率测距

测距是扩频技术最突出的应用。无线电测距在测量距离增大的情况下,反射信号变弱,造成接收困难。为克服这一困难,就必须加大发射信号的功率。增大脉冲雷达信号的峰值功率,会受到设备和器件的限制。加大信号的脉冲宽度,又会降低测距的分辨率。利用连续波雷达测距时,会出现距离模糊问题。利用扩频技术测距,扩频码序列的长度(周期)决定了测距系统的最大不模糊距离;而扩频码序列的速率(码元宽度)决定了测距系统的分辨率。产生长周期高速率的伪随机码,目前已不存在问题。

5.2.4 伪随机序列与正交编码

正交编码与伪随机序列在数字通信技术中都是十分重要的。正交编码不仅可以用做纠错编码,还可以用来实现码分多址通信,目前已经广泛应用于蜂窝网中。伪随机序列在误码率测量、时延测量、扩频通信、密码及分离多径等方面都有着十分广泛的应用。

1. 伪随机序列

伪随机序列在扩频系统或码分多址系统中起着十分重要的作用。因为这类码序列最重要的特征是具有近似随机信号的性能,也可以说具有近似于白噪声的性能。类似白噪声的随机信号是传输信息理想的信号形式。因为在信息传输中,各种信号之间的差异性越大越好,这样任意两个信号之间不容易发生干扰,不会误判。在任何时间段,取两段不同的类似白噪声的随机序列来比较,都不会完全相似,用它们分别代表两种信号,其差别性就最大。但是,真正的随机信号或白噪声是不能重复产生的,只能用一种周期性的脉冲信号(序列码)来逼近它的性能,故称为伪随机码或 PN 码。其实早在 20 世纪 50 年代,哈尔凯维奇已从理论上证明:要克服多径衰落干扰的影响,信道中传输的最佳信号形式应该是具有白噪声统计特性的信号形式。采用伪随机序列的扩频函数,很逼近白噪声的统计特性,因而扩频通信系统具有抗多径干扰的能力。扩频通信常用的伪随机序列有 m 序列、M 序列、Gold 序列、R-S 序列等。

2. 正交编码

扩频通信之所以选用随机信号来传输信号,本质是为了实现多址通信,因此信号之间必须实现正交或准正交。如 m 序列、Gold 序列都属于准正交的 PN 序列。什么是正交呢?比如两条直线垂直称为正交,同一对载频相位差为 90° 的两个波形也称为正交。在 CDMA 系统中,每个小区的所有信道共用一个频带,为了消除多址干扰,应该采取一定的措施,使得在各条信道中传输的信号是相互正交的。所谓的正交序列就是互相关函数为 0 的一组周期码序列。正交性定义为:如果两个周期为 T 的模拟信号 $s_1(t)$ 和 $s_2(t)$ 互相正交,则有

$$\int_0^T s_1(t)s_2(t)dt = 0 \quad (5-2)$$

同理, 如果 M 个周期为 T 的模拟信号 $s_1(t), s_2(t), \dots, s_M(t)$ 构成一个正交信号集合, 则有

$$\int_0^T s_i(t)s_j(t)dt = 0 \quad (i \neq j; i, j=1, 2, \dots, M) \quad (5-3)$$

理解正交性还需要了解互相关的概念。对于二进制数字信号, 用一个数字序列表示码组。两个码组的正交性, 可用如下形式的互相关系数来表述。设长为 n 的编码中码元只取值 $+1$ 和 -1 , x 和 y 是其中两个码组: $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ 和 $y = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_n)$, 其中 $x_i, y_i \in (+1, -1)$, $i=1, 2, \dots, n$, 则 x 和 y 间的互相关系数定义为 $\rho(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i$, 若码组 x 和 y 正交, 则必有 $\rho(x, y) = 0$ 。例如, 图 5-5 (a) 所示的 4 个数字信号可以看做图 5-5 (b) 图所示的 4 个码组。

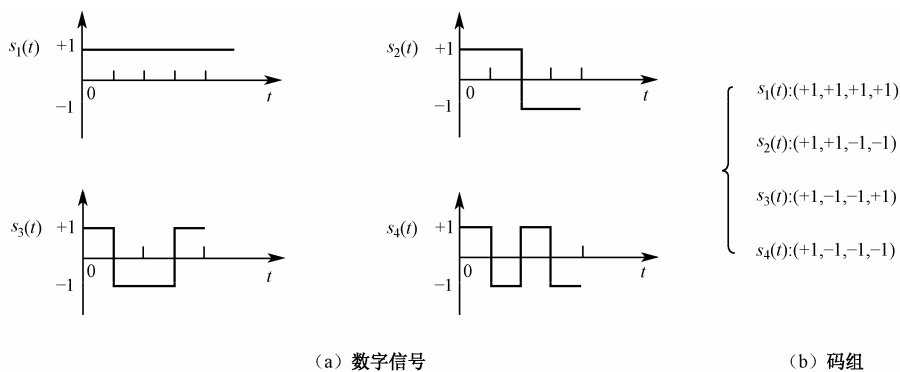


图 5-5 正交编码举例

按照互相关系数定义式计算容易得知, 这 4 个码组中任意两者之间的相关系数都为 0, 即这 4 个码组两两正交。把这种两两正交的编码称为正交编码。

CDMA 系统常使用相互正交的 Walsh (沃尔什) 函数, 这是由于 Walsh 函数具有良好的互相关特性和较好的自相关特性。但需要注意的是, Walsh 序列并不属于 PN 序列。Walsh 码来源于 H 矩阵, 根据 H 矩阵中 “+1” 和 “-1” 的交变次数重新排列, 就可以得到 Walsh 矩阵。该矩阵中各行列之间是相互正交 (Mutual Orthogonal) 的, 可以保证使用它扩频的信道也是互相正交的。对于 CDMA 前向链路, 采用 64 阶 Walsh 序列扩频, 每个 W 序列用于一种前向物理信道 (标准), 实现码分多址功能。信道数记为 $W_0 \sim W_{63}$, 码片速率为 1.228 8Mc/s。沃尔什序列可以消除或抑制多址干扰 (MAI)。理论上, 如果在多址信道中信号是相互正交的, 那么多址干扰可以减少至零。然而实际上由于多径信号和来自其他小区的信号与所需信号是不同步的, 共信道干扰不会为零。异步到达的延迟和衰减的多径信号与同步到达的原始信号不是完全正交的, 这些信号就带来干扰。来自其他小区的信号也不是同步或正交的, 这也会导致干扰发生。连续的 Walsh 函数波形如图 5-6 (a) 所示, 利用 Walsh 函数的正交性, 可做 CDMA 的信道码。如果对图中的 Walsh 函数波形在 8 个等间隔上取样, 即得到 8×8 的离散 Walsh 函数矩阵, 如图 5-6 (b) 所示。

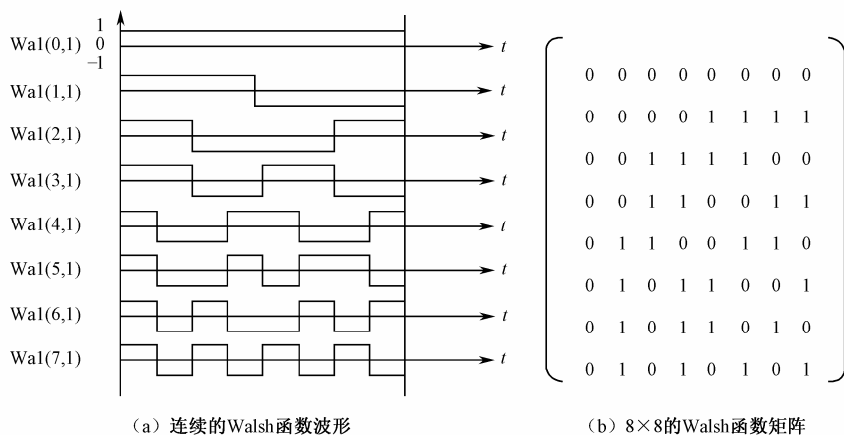


图 5-6 连续的 Walsh 函数波形

利用 Walsh 函数矩阵的递推关系, 可进一步得到 64×64 的 Walsh 序列。因为是正交码, 所以可供码分的信道数等于码序列长度 64, 用 $W_0, W_1, W_2, \dots, W_{63}$ 表示, 这些序列被用做前向码分信道, 即基站到移动台的下行链路。

5.3

CDMA 功率控制及软切换技术

CDMA 系统是一个自干扰系统, 主要体现在 CDMA 技术的多址干扰上, 且 CDMA 蜂窝系统的远近效应也是非常突出的问题。有效的通信在接收端收到信号的信噪比必须足够大, 然而当移动设备从基站发射器附近向外移动时, 由于正常的衰减, 收到的信号功率将逐渐下降。此外, 功率电平是来自许多不同路径的信号总和, 而且这些路径状态是随机的, 所有反射、散射和衍射的共同作用能导致短距离内收到的信号功率快速变化, 形成多址干扰。干扰增加就会导致系统容量的降低, 信噪比下降, 这就要求基站增大信号发射功率。然而为了减小同频干扰, 必须降低辐射, 又要求使移动设备的发射信号功率最小化。在使用 CDMA 系统时, 要求在基站处对收到的所有移动设备的发射功率电平做到均衡, 因此功率控制对 CDMA 系统性能的影响是十分重要的。

5.3.1 CDMA 系统的功率控制

根据功率控制方法的链路形成和控制链路的方, 将功率控制技术分为开环和闭环功率控制及前向和反向链路功率控制。

1. 开环和闭环功率控制

从功率控制方法的角度, 功率控制可分为开环 (Open Loop) 功率控制和闭环 (Close Loop) 功率控制。

1) 开环功率控制

开环功率控制指移动台 (或基站) 根据接收到的前向或反向链路信号功率的大小来调整自己的发射功率。开环功率控制用于补偿信道的平均路径损耗及衰落, 因此它有一个很大的动态范围。

开环功率控制的前提条件是假设前向和反向链路的衰落情况是一致的。以反向链路为例，移动台接收并测量前向链路的信号强度，估计前向链路的传播损耗，然后根据这种估计，调整其发射功率。当接收信号较强时，表明信道环境较好，就降低发射功率；接收信号较弱时，表明信道环境较差，将增加发射功率。

开环功率控制的优点是简单易行，不需要在基站和移动台之间交换信息，可调范围大，控制速度快，控制开销小。开环功率控制对于降低慢衰落的影响能取得非常好的效果，比如车载移动台快速驶入地形起伏的山区或高大建筑物遮蔽区所引起的信号变化。但是对于信号因多径传播而引起的快速衰落变化效果不好。这是因为在频分双工的 CDMA 系统中，前向链路与反向链路所占用的频段相差 45MHz 以上，远大于信号的相关带宽。因此前向链路与反向链路的快衰落是完全独立不相关的，不能认为移动台在前向信道上测得的衰落就等于反向信道上的衰落特性，这会导致在某些时刻出现较大误差，使开环功率控制的精度受到一定的影响，所以只能起到粗略控制的作用。开环方式没有闭环方式准确，但是开环方式能够更快地对信号强度的快速波动做出反应，并且对于慢衰落受到不对称的影响相对小一些，因此开环控制仍然在系统中采用。

2) 闭环功率控制

闭环功率控制建立在开环功率控制的基础之上，对开环功率控制进行校正。以反向链路为例，基站根据反向链路上移动台的信号强弱，产生功率控制指令，并通过前向控制链路将功率控制指令发送给移动台。然后移动台根据此命令，在开环功率控制所选择发射功率的基础上，快速校正自己的发射功率。可以看出，在这个过程中形成了控制环路，因此称这种方法为闭环功率控制。闭环功率控制可以降低部分信道快速衰落的影响。

闭环控制的主要优点是控制精度高，用于通信过程中发射功率的精细调整。但从功率控制命令发出到执行存在一定的时延，当时延上升时，功率控制的性能将严重下降。闭环功率控制又细分为：内环（Inner Loop）功率控制和外环（Outer Loop）功率控制。

仍然以反向链路为例，内环功率控制指基站测量接收到的移动台信号（通常是信噪比），将其与某个门限值相比较。如果高于这个门限值，就向移动台发射降低信号发射功率的指令；反之则发送增加信号发射功率的控制指令，以使接收到的信号强度接近门限值。

外环功率控制的作用是对内环门限进行调整，这种调整是根据接收信号质量指标（如误帧率 FER）的变化来进行的。通过测量误帧率，并定时根据目标误帧率来调节内环门限的大小，以维持恒定的目标误帧率。当实际接收的 FER 高于目标值时，则提高内环门限；当实际接收的 FER 低于目标值时，则适当降低内环门限。

由外环和内环功率控制的过程可以看出，外环功率控制主要是为了适应无线信道的变化，动态调整内环功率控制中的信噪比门限。这就使功率控制直接与通信质量相联系，而不仅仅是体现在信噪比的改善上。

2. 前向和反向功率控制

从通信链路方向的角度，功率控制可分为前向功率控制和反向功率控制。

1) 反向功率控制

反向功率控制也称为上行链路功率控制。其主要的要求是使任意移动台无论处于什么位置上，信号在到达其基站的接收机时，都具有相同的电平，而且刚刚达到信噪比要求的门限。显然，能做到这一点，既可最大限度地减小多址干扰，又可有效防止远近效应，保证系统容量。

进行反向功率控制的办法，可以是移动台接收并测量基站发来的信号强度，并估计正向传

输损耗, 然后根据这种估计值来调节移动台的反向发射功率。如果接收信号增强, 就降低其发射功率; 如果接收信号减弱, 就增强其发射功率。反向功率控制还可以进一步细分成反向开环功率控制和反向闭环功率控制。

(1) 反向开环功率控制。在这种方式下, 移动台根据整个频段内接收到的前向链路总功率, 结合已知的一些接入参数, 采用一定算法, 计算得出接入时的发射功率大小。其基本原则是如果接收功率高于目标值, 则移动台降低发射功率; 如果接收功率低于这个目标值, 移动台就增加发射功率, 以保持发射功率总是接近这个目标值。由于开环功率控制是为了补偿平均路径损耗及慢衰落的, 所以必须要有一个很大的动态范围。根据空中接口标准, 它至少应该达到 $\pm 32\text{dB}$ 的动态范围。

(2) 反向闭环功率控制。反向闭环功率控制是指基站根据测量到的反向信道的质量来调整移动台的发射功率。其基本原则是如果测量到的反向信道质量低于一定的门限, 命令移动台增加发射功率; 如果测量到的反向信道质量高于一定的门限, 则命令移动台降低发射功率。它是对反向开环功率控制的不准确性进行补偿, 需要基站和移动台共同参与, 反向闭环控制在开环功率控制的基础上, 能够提供 $\pm 32\text{dB}$ 的动态范围。

反向闭环功率控制包括两部分: 内环功率控制和外环功率控制。内环功率控制的目的是使移动台业务信道的信噪比 E_b/N_t (E_b 是每个比特的能量, N_t 是噪声的功率频谱密度) 能够尽可能地接近目标, 而外环功率控制则对指定的移动台调整其 E_b/N_t 的目标值, 来维持恒定的目标误帧率, 以适应无线环境的变化, 保证一定的通信质量。如图 5-7 所示, 首先 BS 接收到 MS 的信号并测量接收到的移动台信号质量 (通常是信噪比), 通过将信号质量和其他信息的综合得到一个目标信噪比 E_b/N_t , 该目标 E_b/N_t 是可以根据接收信号的质量及误帧率等参数进行调整的; BS 将反向信道的测量结果 (信噪比) 与设定的 E_b/N_t 门限值比较, 如果高于这个门限值, 就命令移动台降低信号发射功率, 反之则命令移动台增加信号发射功率, 以使接收到的信号强度接近门限值。

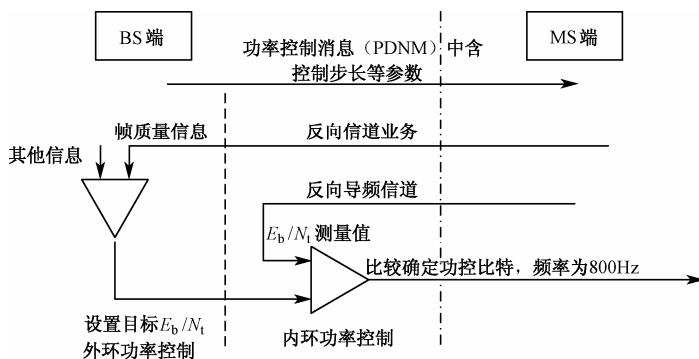


图 5-7 反向闭环功率控制

同时使用外环功率控制和内环功率控制, 既能保证有足够的信号能量, 使接收机在允许的误差概率情况下解调信号, 又可以将对其他用户的干扰降到最低。

对于反向业务信道进行闭环功率控制时, 移动台将根据前向业务信道上收到的有效功率控制比特 (在功率控制子信道上) 来调整其平均输出功率。功率控制子信道不断地在前向业务信道上以 800bps 的传输速率发送功率控制比特。“0”指示移动台增加平均输出功率, “1”指示移动台减小平均输出功率。CDMA 系统中, 每个功率控制比特使移动台增加或减少功率的大小,

即功率步长为 1dB。

在 IS-95 系统中, 业务信道的帧长为 20ms。每帧被分为 16 个时隙, 每个时隙被称为一个功率控制组 (Power Control Group, PCG)。

基站测量所有移动台反向信道的 E_b/N_t , 测量周期为 1.25ms, 即在一个 PCG 内进行。基站测量结果与 E_b/N_t 目标值比较, 分别确定对各个移动台的功率控制比特取值, 然后基站在相应的前向业务信道上将功率控制比特发送出去。基站发送的功率控制比特比反向业务信道延迟 $2 \times 1.25\text{ms} = 2.5\text{ms}$ 。比如说, 基站收到反向业务信道中第 5 个功率控制信号, 则其对应的功率控制比特在前向业务信道的第 7 个功率控制组中发送。一个功率控制比特的比特长度正好等于前向业务信道两个调制符号长度。在发送时, 每个功率控制比特将替代两个连续的前向业务信道调制符号。移动台接收前向信道后将从中抽取功率控制比特, 进而对反向业务信道的发射功率进行调整。

2) 前向功率控制

在 IS-95 CDMA 系统中, 前向功率控制是基站根据移动台提供的测量结果, 调整对每个移动台的发射功率。其目的是对衰落小的移动台分配较小的发射功率, 对衰落大的移动台分配较大的发射功率, 在保证移动通信质量的前提下, 尽量减小业务信道的发射功率, 从而降低干扰。基站根据移动台提供的前向链路错误帧率的反馈报告, 来决定增加还是减小对该移动台的发射功率。从这个意义上说, 前向链路功率控制采用的也是闭环的形式。

在前向链路中, 由于小区内各个信道之间是同步的, 并且移动台可以根据前向导频信道进行相干解调, 这使得前向链路的质量远好于反向链路。前向链路对功率控制动态范围的要求也相对较低。在 IS-95 CDMA 前向链路中, 采用一种基于信令消息的慢速功率控制, 就可以很好地控制每个信道的发送功率。

相对于 IS-95 系统, CDMA2000-1X 系统对前向链路的功率控制做了很大的改进。改进后的前向功率控制和反向功率控制一样, 最高可达 800Hz 的控制速率, 能够跟踪补偿更快的衰落。CDMA2000-1X 系统的语音容量在理论上是 IS-95 CDMA 系统的两倍, 其中前行链路功率控制的改进尤为突出。功率控制原理如图 5-8 所示。MS 接收并测量来自前向业务信道的信号, 并将测量值与设定的目标信噪比 E_b/N_t 相比较, 将比较结果及前向链路错误帧率 FER 反馈给 BS, BS 根据这些信息来调节对 MS 的功率分配。

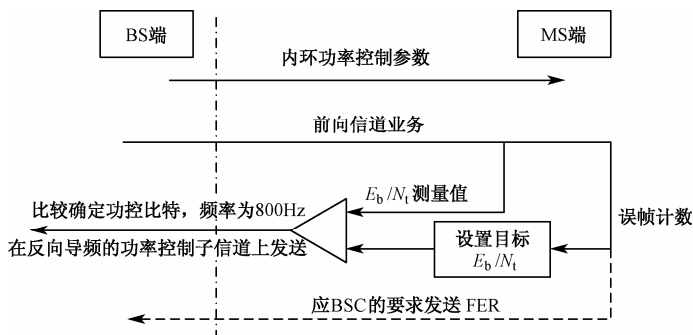


图 5-8 CDMA2000-1X 前向功率控制

CDMA2000-1X 前向快速功率控制的原理与反向闭环功率控制相似, 它在移动台增加了一个功率控制环, 用于保持一个确定的 E_b/N_t 目标值。前向内环功率控制测试点是 E_b/N_t , 外环功率控制测试点是 FER。

前向功率控制比特是在反向导频信道的子信道上发送的,速率通常是 800bps。每个 20ms 的帧中包括 16 个功率控制组,每个功率控制组包含一个功率控制比特。功率控制子信道主要分为反向功率控制子信道和辅助反向功率控制子信道。

5.3.2 CDMA 系统的软切换

根据移动台与原基站及目标基站连接方式的不同,可以将越区切换分为硬切换和软切换两大类。

硬切换(Hard Handoff, HHO)是指在新的通信链路建立之前,先中断旧的通信链路的切换方式,即先断后通。在整个切换过程中移动台只能使用一个无线信道。在从当前的服务链路过渡到新的服务链路时,硬切换存在通话中断,但是时间非常短,用户在一般情况下是感觉不到的。在这种切换过程中,可能存在原有链路已断开但是新的链路没有建立成功的情况,这样移动台就会失去与网络的连接,即产生掉话。采用不同频率的小区之间只能采用硬切换,所以模拟系统和 TDMA 系统(如 GSM 系统)都是采用硬切换的方式。硬切换方式的失败率相对较高,如果新基站没有空闲信道或是切换信令的传输出现错误,都会导致切换失败。另外,当移动台处于两个基站的交界处时,由于两个基站在该处的信号都较弱,且有起伏变化,很容易导致移动台在两个基站之间反复要求切换,即乒乓效应,使系统控制器的负载加重,通信中断的可能性也随之增加。据统计,在模拟系统和 TDMA 系统中,无线信道上 90%以上的掉话都是在切换过程中发生的。

软切换(Soft Handoff, SHO)是指需要进行越区切换时,移动台先与目标基站建立通信链路,再切断与原基站之间的通信链路的切换方式,即先通后断。软切换只有在使用相同频率的小区之间才能进行,因此在模拟系统和 TDMA 系统中,均不具备进行软切换的条件。软切换是 CDMA 系统特有的关键技术之一,也是网络优化的重点,软切换算法和相关参数的设置对系统容量和服务都有重要影响。由于采用软切换,CDMA 移动通信系统具有如下好处。

1. 提高切换成功率

在软切换的过程中,移动台同时与多个基站进行通信。只有当移动台与新的基站建立稳定的连接后,原有的基站才会中断其通信控制,因此,与硬切换相比软切换的失败率要小得多,有效地提高了切换的可靠性,大大降低了由于切换造成的掉话。

2. 增加系统容量

当移动台与多个基站进行通信时,有的基站命令移动台增加发射功率,有的命令移动台降低发射功率,这时移动台优先考虑降低发射功率的命令。这样,从统计学的角度讲,降低了移动台的整体发射功率,从而降低了对其他用户的干扰。CDMA 是自干扰系统,所以任何降低噪声的方法都可以直接转化为系统容量的增加。而降低了发射功率,实际上就降低了背景噪声,因此增加了系统容量。

3. 提高通信质量

在软切换的过程中,下行链路中多个基站向移动台发送相同的信号,移动台解调这些信号,就可以进行分集合并,从而提高下行链路的抗衰落能力。在上行链路,多个基站接收到一个移动台的信号,通常这些基站进行解调后送至基站控制器(BSC),在 BSC 中用选择器选择质量最好的一路作为输出,从而实现上行链路的分集接收。因此,采用软切换可以提高接收信号的质量。

当然,软切换也有一些缺点,比如导致硬件设备增加,占用更多的资源,当切换的触发机

设定不合理导致过于频繁地控制消息交互时,也会影响用户正在进行的呼叫质量。

5.4

CDMA 系统信道结构

CDMA 的信道可分为基站至移动台方向的前向 CDMA 信道(下行链路)和移动台至基站方向的反向 CDMA 信道(上行链路)。

1. 前向信道

前向信道结构如图 5-9 所示。前向信道采用正交扩频形成码分信道。正交序列是利用 Walsh 函数矩阵的递推关系,进一步得到 64×64 的 Walsh 序列。因为是正交码,所以可供码分的信道数等于码序列长度 64,用 $W_0, W_1, W_2, \dots, W_{63}$ 表示,这些序列被用做前向码分信道,即基站到移动台的下行链路。

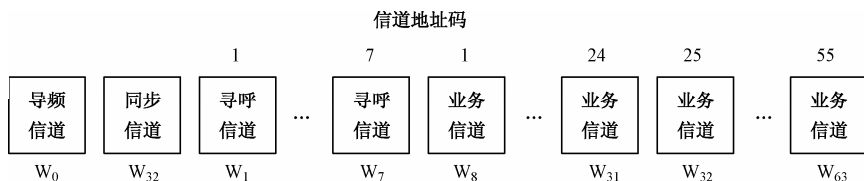


图 5-9 前向信道结构

在下行链路的逻辑信道中,除了业务信道用于传输业务信息外,还有控制信道。控制信道包括导频信道、同步信道和寻呼信道。

1) 导频信道

导频信道用于传送导频信息,无数据调制,只为小区内的 MS 提供同步。基站利用引导 PN 序列的时间偏置来标识每条前向 CDMA 信道。由基站连续不断地发送一种直接扩频序列信号,供移动台从中获得前向信道的定时和提取相干载波进行相干解调,并可通过对导频信号强度进行检测,比较相邻基站的信号强度和决定什么时候需要进行越区切换。

2) 同步信道

同步信道用于传输同步信号,在基站覆盖的通信范围内,各移动台可利用这种信息进行同步捕获。当 MS 通过导频与引导 PN 序列同步后,就认为移动台与同步信道保持同步,此时移动台可以解调同步信道数据信息。同步信道数据信息包括系统时间、导频偏置及寻呼信道的状态信息等。

3) 寻呼信道

寻呼信道供基站在呼叫建立阶段传输控制信息。通常移动台在建立同步之后,就选择一个寻呼信道监听由基站发来的信令,在收到基站分配业务信道的指令后,就转入指派的业务信道中进行信息传输。

4) 业务信道

前向业务信道是用于传输用户数据和信令信息的信道。通常传送的业务数据均经过与用户号码对应的 PN 序列的调制,以确保通信的保密性。另外,前向业务信道中包含一个用于控制移动台发射功率的功率控制信息和一些用于越区切换的控制信息。

2. 反向信道

IS-95 在移动台至基站的上行链路中,包括了接入信道和业务信道。通常采用 m 序列和 Gold 序列等来形成接入信道与业务信道,如图 5-10 所示。其中接入信道与正向传输的寻呼信道相对应,其作用是在移动台没有占用业务信道之前,提供由移动台到基站的传输通路,供移动台发起呼叫,对基站的寻呼进行响应,以及向基站发送登记注册的信息等。接入信道允许多个用户以竞争方式占用。

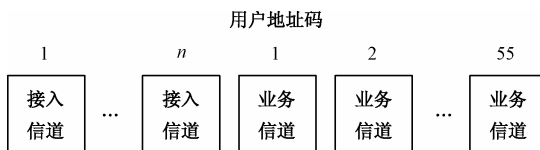


图 5-10 移动台到基站的上行链路

反向业务信道是在呼叫建立期间用于传输用户信息和信令信息的信道,它提供基本业务、信令和辅助业务的传输。反向业务信道要同时在一业务信道上传送多种业务时,需要进行复用选择。复用选择传输基本业务、信令业务和辅助业务。

5.5 CDMA 系统的主要业务

CDMA 是一种先进的移动通信系统,已经成为移动通信发展的主流技术,受到了越来越多用户的青睐。本节以 CDMA2000-1X 系统为例,介绍 CDMA 系统的主要业务。

5.5.1 CDMA2000-1X 网络的业务定位

随着移动用户数量的增长,移动用户的消费行为也在发生着变化,移动通信运营商仅提供语音业务已不能满足消费者的需求。从目前信息领域的市场发展来看,以因特网为主体的 IT 业和以移动通信、数据通信为主体的通信业无疑是发展速度最快、潜力最大、效益好的产业。宽带化、个人化将是本世纪信息通信业的发展方向,而如何将 IP 延伸到无线领域,如何将 IP 技术与移动通信融合在一起,则是近年该领域发展的重点。

如果说 IP 技术和因特网的发展彻底改变了通信世界,那么移动和因特网的结合又将给通信界带来一场深刻变革,“移动+IP=21 世纪的信息服务提供商”将演变为信息业的主流。因此,移动通信运营商必须提供高质量、高效率、多样化的服务。

据统计,目前在移动通信的收入中,每月已有约 10 亿元人民币是来自于短消息业务。今后移动用户的需求不会仅限于短消息低速数据业务,Internet 接入、多媒体、电子商务等数据新业务也将不断涌现。可以预见,为适应市场需求,CDMA2000-1X 网络将提供基本业务、智能网业务和无线数据业务。

无线数据业务包括以下服务:

1. 短消息业务

如收发短消息、话费查询、小区广播、铃声下载、Logo 图片下载。

2. 无线 Internet 业务

如 WWW 浏览、WAP 浏览、收发 E-mail、FTP、移动 QQ、信息点播等。

3. 移动定位业务

如紧急救助、跟踪服务、导航、城市地图、基于位置信息的定点内容广播、移动黄页等。

4. 移动电子商务业务

如电子银行、电子彩票、电子购票、移动支付、预定服务、移动股票交易等。

5. 移动多媒体业务

如视频点播、可视电话、交互式游戏等。

6. 移动 VPN 业务

银行、外企等大的集团用户还可以直接利用 CDMA 网络构建自己的虚拟专用网络。

5.5.2 CDMA 系统的主要业务

CDMA2000-1X 网络可以作为语音业务的承载平台,也可以作为无线接入 Internet 分组数据承载平台,既可以为用户提供传统的语音业务,也可以为用户提供端对端分组传输模式的数据业务。从宏观上讲,CDMA2000-1X 网络提供的业务通常可以分为基本业务、智能网业务、无线数据业务 3 大类。

1. 基本业务

基本业务是由 CDMA2000-1X 基础网络设施(包括交换子系统和无线子系统)直接提供的业务,可分为基本语音业务、语音补充业务、语音增值业务和承载业务 4 类。

1) 基本语音业务

(1) 呼叫前转类业务。

业务描述:用户可以预置条件或临时选择将呼叫转接到第三方。

业务类别:可细分为无条件呼叫前转、遇忙呼叫前转、无应答呼叫前转、隐含呼叫前转、选择呼叫前转、呼叫转移等业务。

(2) 呼叫限制/呼叫过滤类业务。

业务描述:用户可在各种情况下对呼入和呼出进行限制和筛选。

业务类别:可细分为用户 PIN 码接入、用户 PIN 码拦截、选择性呼叫接受、针对号码拒绝、口令呼叫接受、免打扰、入呼叫筛选等业务。

(3) 群组呼叫/多方呼叫。

业务描述:提供各种特性的群组呼叫/多方呼叫业务。

业务类别:可细分为会议呼叫、三方呼叫、闭合用户群、呼叫保持/呼叫等待、非公共业务(拨打短号、按地理位置或逻辑位置定义群组、灵活资费等)、用户群提示、移动接入寻线等业务。

(4) 呼叫显示提醒/限制类业务。

业务描述:提供各类来话提醒和限制。

业务类别:可细分为主叫线识别显示、主叫线识别限制、主叫名识别显示/限制前转礼貌提醒(用户 A 激活呼叫前转至用户 B 需征得用户 B 同意)、来话通知(被叫不能接通时,网络自动发送短消息通知)等业务。

(5) 业务控制管理类业务。

业务描述:网络提供用户优先级、优选语言及用户实时修改业务属性等。

业务类别:可细分为远端补充业务控制(FC)、单次业务优选语言(PL)/增强型优选语言

(EPL)、优先接入及信道指配 (PACA) 等业务。

2) 语音增值业务

(1) 移动语音信箱业务。

主要功能：可为用户提供留言、提取留言、信箱维护、留言通知、定时邮寄、分信箱、自动应答等服务。

业务类别：可细分为普通用户信箱、虚拟电话、布告栏 3 类。

该业务可通过在 MSC 侧增加语音信箱功能部件实现。

(2) IP 电话业务。

IP 电话业务是指在 IP 网络上通过 TCP/IP 协议，实现实时传送语音信息的通信业务。该业务对 CDMA 网络无特殊要求，只需在 Internet 网络侧增加 IP 电话网关及关守设备和软件即可实现。

3) 承载业务

在用户和网络接口之间向用户提供和运送基本比特的低层功能的业务。

2. 智能网业务

移动智能网业务是结合移动通信网和智能网业务平台，提供给用户的各种补充业务，包括预付费业务、亲情卡和亲情号码业务、移动虚拟专业网业务、被叫集中付费业务、通用个人通信业务、无线广告业务、时分分区计费业务、统一接入号码业务和号码可携带性业务。

3. 无线数据业务

随着语音业务的普及和用户需求的不断提升，再加上互联网的巨大成功，无线数据业务势必成为移动运营商下一个巨大的利润增长点。可通过建立短消息业务支撑平台或 IP 业务支撑平台来提供无线数据业务。

4. 基本短消息业务

可为用户提供手机发起的短消息业务、手机终止的短消息业务、小区广播短消息业务、与语音信箱配合完成语音信箱通知业务、中文短消息业务、人工接续和自动接续的短消息业务、首选漫游列表下载业务。

5. 增值短消息业务

增值短消息业务是在短消息中心的基础上，通过数据业务综合管理平台接入外部信息资源，以短消息为信息传输手段的业务。可细分为信息类业务、个人信息管理类业务、交易类业务、娱乐类业务、基于位置的服务类业务和行业应用类业务。短消息业务由于受到信道容量和短消息技术本身的影响，只能提供低速和实时性要求不太高的数据业务。

6. 无线 Internet 业务

无线 Internet 业务中，除了 Internet 接入和多媒体业务是其特有的业务外，其他业务应用类型与短消息业务类似，但无线 Internet 业务提供的是中高速率的数据业务，并将提高同类业务的实时性。

7. 移动定位业务

移动定位业务是移动网络运营商利用专门的移动定位技术确定移动台的地理位置，并向移动用户提供与位置相关的业务。根据业务不同的发起方式，可分为按需激活的移动定位服务和定时激活的移动定位服务。

8. 移动电子商务

移动电子商务是利用 TCP/IP 公众网络和技术, 通过移动终端进行的在线交易和商务作业活动, 其应用范围十分广泛。依据是否涉及资金流, 分为支付型电子商务和非支付型电子商务; 依据服务对象, 分为企业对企业 (B to B) 的电子商务、企业对消费者 (B to C) 的电子商务、消费者对消费者 (C to C) 的电子商务。

9. 移动多媒体业务

移动多媒体业务是通过移动终端进行多媒体通信的业务, 可分为会议业务、会话业务、分配业务、检索业务、采集业务、消息业务等。

目前, CDMA2000-1X 技术已经相当成熟, 但 CDMA2000-1X 网络建设与运营的成功与否, 越来越多地取决于它的业务设计和业务开展情况。

5.6

习题

1. 填空题

(1) CDMA 蜂窝移动通信系统以_____为基础, 具有_____、_____、_____、大的系统容量等一系列优点。

(2) CDMA 系统上行链路传输频段为_____, 下行链路的传输频段为_____。

(3) 扩频技术是以_____为基础的, 以信息_____来换取信噪比改善的一种宽带调制技术, 也是_____的基础。

(4) 类似白噪声的_____是理想的传输信息的信号形式, 这是因为在信息传输中各种信号之间的_____越大越好。

(5) 反向功率控制主要的要求是使任意移动台无论处于什么位置上, 信号在到达其基站的接收机时, 都具有_____的电平, 而且刚刚达到_____要求的门限。

(6) CDMA 的信道可分为_____信道和_____信道。

2. 是非判断题 (正确画√, 错误画×)

(1) 在 CDMA 系统中, 不同用户传输信息所用信号是靠频率不同或时隙不同来区分的。 ()

(2) 在数字蜂窝通信系统中, 全网必须具有统一的时间基准。 ()

(3) 传统的调制技术的设计思想是使传输带宽最大化, 其目的是提高频带利用率。 ()

(4) 扩频通信之所以选用随机信号来传输信号, 本质是为了实现多址通信, 因此信号之间必须实现正交。 ()

3. 选择题 (将正确答案的序号填入括号内)

(1) CDMA 系统中每一个载频共分为 () 个码分信道, 每一个小区可以分为 3 个扇形区, 可共用一个载频, 每一个网络可分为 () 个载频。

A. 48, 9

B. 64, 9

C. 64, 6

D. 48, 6

(2) 下列编码不属于伪随机序列的是 ()。

- A. m 码 B. Gold 码 C. M 码 D. Walsh 码
- (3) 电子商务中企业对企业的服务简称为 ()。
- A. B to B B. B to C C. C to C D. C to B

4. 简答题

- (1) 什么是扩频通信? 扩频技术的两个特点是什么?
- (2) 与传统的数字调制技术相比较, CDMA 有哪些优势?
- (3) 简述 CDMA 系统开环功率控制的过程。
- (4) 简述 CDMA 系统闭环功率控制的过程。
- (5) 典型的移动卫星通信系统有哪些?
- (6) 简述 CDMA 系统信道的结构。
- (7) 简述 CDMA 系统的主要业务。

5. 画图题

画出 FHSS 通信系统原理方框图, 并简述其工作过程。

调研项目: 我国 CDMA 移动通信基站建设现状研究



调研目的:

1. 通过调研, 了解我国 CDMA 移动通信基站近几年建设的现状。
2. 根据前几年 CDMA 的市场发展情况, 科学、严谨地预测未来的市场状况。
3. 增强对 CDMA 移动通信的认识, 提高读者学习移动通信技术的积极性, 了解中国 CDMA 移动通信基站建设的必要性。



调研要求:

1. 在调研的基础上, 要按统一要求格式撰写 5 000 字左右的《中国 CDMA 移动通信基站项目可行性研究综合论证》调查研究报告。
2. 调研资料要真实、可靠, 论证要清晰、准确。报告中, 在简述我国 CDMA 移动通信基站建设过程的基础上, 重点阐述当前我国 CDMA 移动通信基站建设中财务的营利性, 经济上的合理性, 技术上的先进性和适应性, 以及建设条件的可能性和可行性, 从而为投资决策提供科学依据。



提示:

可利用图书馆、互联网等查阅有关资料, 在有条件的情况下, 可到有关科研院所、企业、公司进行调研。

实验 5 DS-CDMA (直扩码分多址) 移动通信



实验目的:

了解 DS-CDMA (直扩码分多址) 移动通信原理。



实验方法:

1. 课前仔细阅读实验指导书, 熟悉 DS-CDMA 工作原理, 了解有关测量仪器的使用方法。
2. 测量单信道 DS-CDMA 通信系统发送端及接收端波形, 了解发送端扩频调制及接收端相关检测原理, 初步了解直扩码分多址逻辑信道形成原理。
3. 测量 2 信道 DS-CDMA 通信系统发送端及接收端波形, 进一步了解发送端扩频调制、接收端相关检测及码分多址逻辑信道形成原理。
4. 注意实验过程中观察到的现象, 做好记录, 并进行分析。

>>> 第 6 章

第三代移动通信系统

-  6.1 3G 通信概述
-  6.2 WCDMA 技术
-  6.3 CDMA2000 技术
-  6.4 TD-SCDMA 技术
-  6.5 B3G 与 4G 移动通信系统
-  6.6 双网双待基础
-  6.7 习题

目前全球 3G 市场已初具规模，进入了平稳发展阶段。日本、韩国和欧洲已经形成了几大特色市场，中国也已开始全面建设 3G 网络。可以预见，3G 市场的发展将成为必然趋势。本章以 3G 通信的 3 大主流技术 WCDMA、CDMA2000、TD-SCDMA 网络系统所使用的各项主要技术为内容，对 3G 通信业务的发展现状、关键技术及未来的发展趋势进行介绍。

6.1

3G 通信概述

移动通信技术从模拟系统、数字系统，现已发展为第三代蜂窝移动通信系统。由于第三代移动通信系统的工作频率接近 3GHz，因此将这种通信系统简称 3G 通信系统。

6.1.1 3G 通信的标准化进程

3GPPWCDMA 技术的标准化工作十分规范，自 1999 年 12 月开始，每三个月更新一次。2001 年 3 月份的版本 3GPPR99 是目前最为完善的版本，并与后面的版本兼容。目前全球 3GPPR99 商用化程度最高，全球绝大多数 3G 试验系统和设备研发都是基于该技术标准规范。3GPPR99 的发展方向是基于全 IP 方式的网络构架，已演进成为 R4、R5 两个阶段的序列标准。2001 年 3 月的第一个 R4 版本初步确定了未来发展的框架，部分功能进一步增强，并启动了部分 IP 演进内容。3GPP 在 2002 年 3 月完成了全 IP 方式的第一个版本 R5，其核心网的传输、控制和业务分离，IP 化将从核心网(Core Network, CN)逐步延伸到无线接入网络部分(Radio

Access Network, RAN) 和用户设备 (User Equipment, UE)。自 2002 年 6 月起到现在, 3GPP 正在进行 R6 和 LTE 有关的标准化工作。TD-SCDMA 属于 3GPP, 第一版本在 R4 中, 其标准发展将与 3GPP 标准发展同步。

3GPP2 已推出基于 IS-95 核心网 ANSI-41 的 MSC/PDSN 向 CDMA2000 的过渡方案 RA, 这里, MSC (Mobile Switching Center) 是移动交换中心, PDSN (Packet Data Serving Node) 是分组数据服务节点, RA 对应 3GPP 基于 GSM/GPRS 核心网向 WCDMA 的过渡方案 R99。3GPP2 还推出了向 CDMA2000 过渡的全 IP 网络方案 RB, RB 对应 3GPP 向 WCDMA 过渡的全 IP 网络方案 R5。目前, 3GPP2 已完成了 R0、RA、RB、RC、RD 标准, 正在制定 AIE 有关标准。

3GPP 制定的 WCDMA、TD-SCDMA 和 3GPP2、CDMA2000 标准的演进策略总体上都是渐进式的, 这是为了保证现有 2G 投资和运营商利益, 有利于现有技术的平滑过渡。但在空中接口方面, WCDMA 要发生革命性的改变, 与原来 GSM 系统完全不同。而 CDMA2000 则可以兼顾与 IS-95 在空中接口的兼容性。

6.1.2 3G 的频谱分配

WRC-2000 的频谱分配示意图如图 6-1 所示, 国际电联对第一代移动通信系统 IMT-2000 划分了 230MHz 频率, 即上行频率为 1 885~2 025MHz, 下行频率为 2 110~2 200MHz, 共 230MHz。其中, 1 980~2 010MHz (地对空) 和 2 170~2 200MHz (空对地) 用于移动卫星业务。上、下行频带不对称, 主要考虑可使用双频 FDD 方式和单频 TDD 方式。此规划在 WRC92 上得到通过, 2000 年的 WRC2000 大会上, 在 WRC92 基础上又批准了新的附加频段: 806~960MHz、1 710~1 885MHz 和 2 500~2 690MHz。

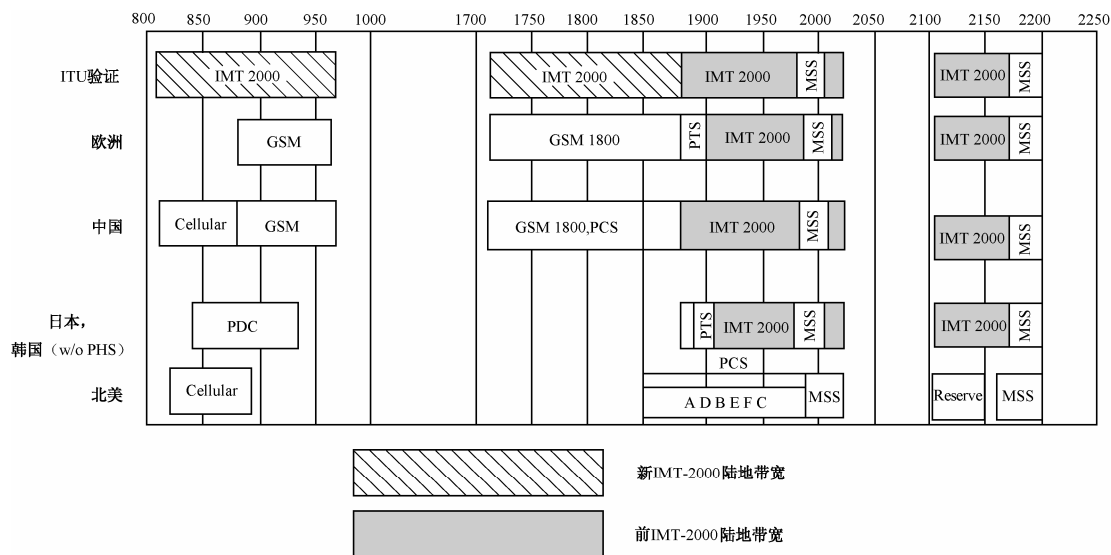


图 6-1 WRC-2000 的频谱分配示意图

欧盟对第三代移动通信的问题也十分重视, 欧洲电信标准化协会早在十多年前就开始了第三代移动通信标准化的研究工作, 成立了一个由运营商、设备制造商和电信管制机构为代表的“通用移动通信系统论坛 (UMTS)”, 1995 年正式向 ITU 提交了频谱划分的建议方案。

欧洲为陆地通信 1 900~1 980MHz、2 010~2 025MHz 和 2 110~2 170MHz, 共计 155MHz。

北美情况比较复杂 (如图 6-1 所示), 在 3G 低频段的 1 850~1 990MHz 处, 实际已经划给 PCS 使用, 且已划成 $2 \times 15\text{MHz}$ 和 $2 \times 5\text{MHz}$ 的多个频段。PCS 业务已经占用的 IMT-2000 的频谱虽然经过调整, 但调整后 IMT-2000 的上行频段与 PCS 的下行频段仍需共用。这种安排不大符合一般基站发高收低的配置。

日本的 1 893.5~1 919.6MHz 已用于 PHS 频段, 还可以提供 $2 \times 60\text{MHz} + 15\text{MHz} = 135\text{MHz}$ 的 3G 频段 (1 920~1 980MHz、2 110~2 170MHz、2 010~2 025MHz)。目前, 日本正在致力于清除与第三代移动通信频率有冲突的问题。

韩国和 ITU 建议一样, 共计 170MHz。

WCDMA FDD 模式使用频谱为 (3GPP 并不排斥使用其他频段): 上行 1 920~1 980MHz, 下行 2 110~2 170MHz; 美洲地区: 上行 1 850~1 910MHz, 下行 1 930~1 990MHz。

WCDMA TDD (包括 High Bit Rate 和 Low Bit Rate) 模式使用频谱为 (3GPP 并不排斥使用其他频段): 上、下行 1 900~1 920MHz 和 2 010~2 025MHz; 美洲地区: 上、下行 1 850~1 910MHz 和 1 930~1 990MHz, 以及上、下行 1 910~1 930MHz 特殊情况下 (如两国边界地区) 可能会出现 TDD 和 FDD 在同一个频带内共存的情况, 3GPP TSG RAN WG4 正在进行这方面的研究。

CDMA2000 中只有 FDD 模式, 目前共有 13 个频段级别 (Band Class), 其中 Band Class 6 为 IMT-2000 规定的 1 920~1 980MHz/2 110~2 180MHz 的频段。

我国的 IMT-2000 频谱使用情况如图 6-2 所示。在我国, 根据目前的无线电频率划分, 1 700~2 300MHz 频段有移动业务、固定业务和空间业务, 该频段内有大量的微波通信系统和一定数量的无线电定位设备正在使用。1996 年 12 月, 国家无线电委员会为了发展蜂窝移动通信和无线接入的需要, 对 2GHz 的部分地面无线业务频率重新进行规划和调整。但还与第三代移动有冲突, 即公众蜂窝移动通信 1.9GHz 的频段和无线接入的频段均占用了 IMT-2000 频段中的一部分。

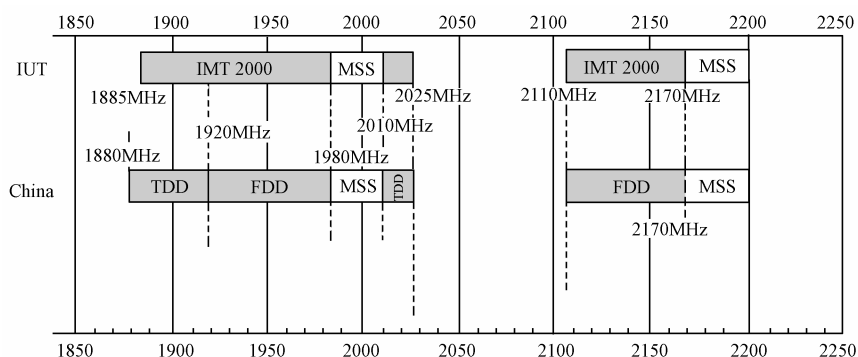


图 6-2 我国 IMT-2000 频谱占用示意图

IMT-2000 在我国的频段分配如下。

(1) 主要工作频段。

频分双工 (FDD) 方式: 1 920~1 980MHz/2 110~2 170MHz; 时分双工 (TDD) 方式: 1 880~1 920MHz/2 010~2 025MHz。

(2) 补充工作频率。

频分双工 (FDD) 方式: 1 755~1 785MHz/1 850~1 880MHz; 时分双工 (TDD) 方式: 2 300~2 400MHz, 与无线定位业务共用, 均为主要业务, 共用标准另行制定。

(3) 卫星移动通信系统 (MSS) 工作频段: 1 980~2 010MHz/2 170~2 200MHz。

6.1.3 3G 通信的关键技术

在 3G 通信系统中, 关键技术如下。

1. CDMA-DS (WCDMA/UTRA)

IMT-2000 CDMA-DS 又称宽带码分多址 (Wide-band CDMA, WCDMA)。WCDMA 的核心网基于演进的 GSM-GPRS 网络技术, 空中接口采用直接序列扩频 (Direct Sequence Spread Spectrum, DS SS), 此标准将同时支持 GSM MAP 和 ANSI-41 两个核心网络。

WCDMA 的技术特点是: 可适应多种速率的传输, 灵活地提供多种业务; 基站收发信机 (Base Transceiver Station, BTS) 之间可以不用全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 同步; 优化的分组数据传输方式; 支持不同载频之间的切换; 上、下行快速功率控制; 反向采用导频辅助的相干检测 (提高反向解调增益, 提高功率控制准确率); 充分考虑了信号设计对电磁兼容的影响。

2. CDMA-MC (CDMA2000)

ITM-2000 CDMA-MC 又称 CDMA2000, 它是北美的朗讯、摩托罗拉、北电、Qualcomm 公司及韩国三星等公司联合提出的基于 CDMA One 的系统方案。CDMA One 是基于 IS-95 标准的各种 CDMA 制造厂家的产品和不同运营商的网络构成的一个家族概念, 也是国际 CDMA 发展组织的一个商品名称。从 CDMA One 演进而来的 CDMA2000 标准是一个体系结果, 包含一系列子标准, 经过融合后只含多载波 (Multi-Carrier, MC) 方式, 即单载波 (1X)、三载波 (3X) 等; 此标准同时支持 GSM MAP 和 ANSI-41 两个核心网络。

3. CDMA-TDD (TD-SCDMA/UTRA-TDD)

IMT-2000 CDMA-TDD 目前包括低码片速率 TD-SCDMA 和高码片速率 UTRA-TDD 两个技术。TD-SCDMA 是时分同步码分多址 (Time Division Synchronous CDMA), UTRA-TDD 是通用陆地无线接入时分双工。TD-SCDMA 是我国提出的国际标准, 一定会在我国得到规模应用, 而 UTRA-TDD 标准制定现在又处于停顿状态, 所以通常提到的 IMT-2000 CDMA-TDD 常指 TD-SCDMA。

4. CDMA-SC (UMC-136)

IMT-2000 TDMA-SC 又称 UMC-136, SC (Single Carrier) 表示单载波。UMC-136 是在美国 IS-136 (D-AMPS) 网络系统基础上发展的标准, 对美国的 IS-136 网络有继承性, IS-136 是 FDMA/TDMA 系统, UMC-136 的双工方式可以是 FDD 或 TDD, 此体制在北美以外没有使用价值。

5. TDMA-MC (EP-DECT)

IMT-2000 TDMA-MC 又称 EP-DECT。MC (Multi Carrier) 表示多载波。EP-DECT 是在泛欧数字无绳电话 (DECT) 基础上稍作修改的标准, DECT 是 FDMA/TDMA 系统, EP-DECT 对于没采用第二代 DECT 的地区没有意义。

6.1.4 3G 的主要业务

1. 语音业务仍占主要地位

尽管 3G 移动通信网络的最大特点是更高的数据业务能力,但对 2005 年以来所有推出 3G 网络的运营商来说,语音业务依旧是他们的主要收入来源,即使在数据业务最发达的日本也是如此。NTTDoCoMo 公司的数据业务总收入仅占公司经营总收入的 35%,但是数据业务收入比重上升的趋势还是非常明显的。一些国际知名的 3G 运营商的数据业务收入比重都有了明显的上升。

2. 新的业务品种层出不穷

随着 3G 网络运营经验的积累增加,3G 在业务创新方面的能力逐渐发挥出来。运营商的业务开发策略也更加专注市场需求,淡化了对 3G 技术和传输能力的宣传。业务的生活化、娱乐化趋势明显。比较瞩目的 3G 新业务主要包括以下几个主要方面。

(1) 移动音乐下载。利用 3G 网络提供具有 CD 音质的整首音乐下载任务。KDDI 公司从 2004 年年底推出该业务,目前已经在日韩、欧美市场获得用户的认可,业务量迅速增加,给运营商带来了直接的经济效益。

(2) 移动 3D 游戏。移动 3D 游戏是指使用内置加速引擎和图像专用芯片的游戏专用手机玩的 3D 游戏。韩国 SKT 在 2005 年上半年推出了 73 种 3D 游戏,5 款游戏专用手机。SKT 计划陆续投资 100 亿韩元,用于 3D 游戏的策划、开发和推广。现在欧美运营商也在考虑引进该项业务。

(3) 移动 P2P 应用。3G 网络能力的提升,使以往 Internet 的业务能被较好地引进到 3G 网络,如通过 P2P 业务共享软件、图片、文件等。目前 TIM 和诺基亚已向意大利 TIM 用户开通了视频共享业务,用户在用手机进行通话的同时,应用该业务可以共享现场照片和视频短片。

3G 业务的花样翻新表明运营商正在努力创造更多、更丰富的业务,将用户吸引到 3G 网络,这是 3G 取得成功的基础和先决条件。随着新的移动运营商不断采用 3G 网络,更多更好的 3G 新业务还会相继被开发出来。

3. 特色业务渐有起色

尽管“可视电话业务”作为 3G 标准性业务的业务特点还没有发展起来,但其他能体现 3G 特色的业务正在扮演着越来越重要的角色,其中以移动音乐下载业务的发展最引人注目。自 2004 年年底到 2005 年年初这段时间,整首音乐的视频、音乐下载及音乐流媒体业务获得了用户的广泛好评,业务量爆发式增长,例如 2005 年 2 月,英国“3”公司宣布,其音乐视频自动点唱机业务在推出 6 个月后,用户下载次数突破 10 000 万次;KDDI 的“Chaku Uta Full”整首音乐下载业务自 2004 年 11 月至 2005 年 6 月,下载量超过了 1 000 万首;2004 年年底,Vodafone Live 推出整首音乐下载业务,不到 4 个月已有了 100 万首音乐的下载量;韩国最大移动运营商 SK 电信公司自从 2004 年 11 月推出数字音乐业务 Melon 以来,在 7 个月的时间里已经吸引了 47 万用户。虽然之前也有移动运营商利用 2.5G 网络提供音乐下载类业务,但由于网络能力限制了业务质量,因此用户反应平淡。而 3G 网络改善了用户对该业务的体验,使用户从简单的铃声、歌曲片段中解脱出来,能利用手机欣赏到真正意义上的音乐和歌曲。音乐下载类业务份额成功,说明了适合市场需求才是 3G 业务开发的真正方向。

6.2 WCDMA 技术

WCDMA 的全称是宽带码分多址 (Wideband CDMA), 也称直接扩频宽带码分多址 (CDMA Direct Spread)。

6.2.1 WCDMA 概述

WCDMA 标准的最初提出者是欧洲电信标准组织 ETSI, 后来与日本的 W-CDMA 技术融合, 成为 ITU 制定 3G 五种技术中的三大主流技术之一, 即 IMT-2000 CDMA-DS。该系统的核心网基于 GSM-MAP, 同时通过网络扩展方式, 提供在基于 ANSI-41 核心网上运行的能力。WCDMA 的主要支撑者都是以 GSM 系统为主的欧美和日本厂商及公司, 如爱立信、阿尔卡特、诺基亚、朗讯、北电, 以及日本的 NTT、富士通、夏普等。

WCDMA 系统支持宽带业务, 可有效支持电路交换业务 (如 PSTN、ISDN 网)、分组交换业务 (如 IP 网)。灵活的无线协议可在一个载波内对同一用户支持语言、数据和多媒体业务, 通过透明或非透明传输块来支持实时、非实时业务。业务质量可通过延迟、误比特率和误帧率等参数进行调整。

WCDMA 系统能够架设在现有的 GSM 网上, 对于系统提供商而言, 可以轻松地平滑过渡。GSM 在世界移动通信的市场占有率超过 74%, 因此 WCDMA 极有先天的市场优势。

WCDMA 与 CDMA2000 这两类宽带 CDMA 技术都属于频分双工 (FDD) 制式, 大多数关键技术非常接近, 性能也基本没有太大的差别。WCDMA 继承了 2G 移动通信体制 GSM 标准化程度高和开放性好的特点, 标准化进展顺利。网络运营商可以通过在 2G 的 GSM 网络上引入 GPRS 网络设备和新业务, 培育数据业务消费群体, 逐步过渡到 3G 的 WCDMA。

6.2.2 WCDMA 系统组成与接口协议

通用移动通信系统 (UMTS) 是采用 WCDMA 空中接口技术的 3G 移动通信系统, 通常也把 UMTS 系统称为 WCDMA 移动通信系统。

1. 系统组成

UMTS 采用了与 2G 移动通信系统类似的结构。UMTS 由通用陆地接入网络 (Universal Terrestrial Radio Access Network, UTRAN)、核心网 (Core Network, CN)、用户设备 (User Equipment, UE)、操作维护中心 (Operations Maintenance Center, OMC) 和外部网络 (External Network, EN) 5 大部分构成, 其网络系统构成和接口如图 6-3 所示。其中 UE 识别用户身份和识别各种业务功能; UTRAN 处理所有与无线有关的事物; CN 处理 UMTS 内所有的语音呼叫和数据连接, 并实现与外部网络的交换和路由功能, CN 从逻辑上分为电路交换 (Circuit Switched, CS) 域和分组交换 (Packet Switched, PS) 域; OMC 对网络和系统设备进行维护和管理; EN 提供各种其他外部网络的信息链接与交换。

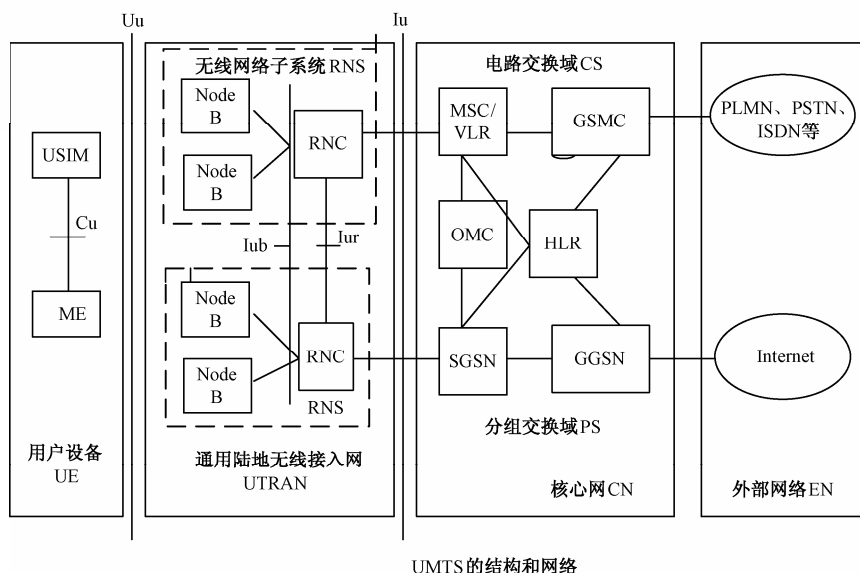


图 6-3 网络系统构成和接口示意图

2. UMTS 的主要接口

从图 6-3 中可以看出，UMTS 主要有如下接口。

(1) Cu 接口。Cu 接口是 USIM 和 ME 质检的电气接口，Cu 接口采用标准接口。

(2) Uu 接口。Uu 接口是 WCDMA 的无线接口。UE 通过 Uu 接口接入到 UMTS 系统的固定网络部分 UTRAN，Uu 接口是 UMTS 系统最重要的开放接口。

(3) Iu 接口。Iu 接口是链接 UTRAN 和 CN 的接口，类似 GSM 系统的 A 接口和 Gb 接口。Iu 接口是一个开放的标准接口，通过 Iu 接口相连接的 UTRAN 与 CN 可以分别由不同的设备制造商提供。

(4) Iur 接口。Iur 接口是无线网络控制器（Radio Network Controller，RNC）之间连接的接口，Iur 接口是 UMTS 系统特有的接口，用于对 UTRAN 中移动台的移动管理。比如在不同的 RNC 之间进行软件转换时，移动台所有数据都是通过 Iur 接口从正在工作的 RNC 传到候选 RNC。Iur 是开放的标准接口，通过 Iur 可以直接在 RNC 间进行物理连接，或者用合适的传输网进行连接。

(5) Iub 接口。Iub 接口是连接节点 B（Node B）与 RNC 的接口，Iub 接口也是一个开放的标准接口，通过 Iub 接口相连接的 RNC 与 Node B 可分别由不同的设备制造商提供。

(6) 外网连接。CN 的电路交换（Circuit Switched，CS）域的 GSM 通过 PSTN/ISDN 接口与外部网络如 PSTN、ISDN 及其他公共陆地移动网（Public Land Mobile Network，PLMN）相连。

CN 的分组交换（Packet Switched，PS）域通过 GGSN 与外部的 Internet 网及其他数据网连接。

以上只列出了 UTRAN 相关的主要接口，没有列出 CN 内部的接口，CN 内部接口与 GSM 网络相应部分的接口变化不大。

3. UMTS 的协议结构

UMTS 的协议结构共分为两层，即接入层（Access Stratum，AS）和非接入层（Non Access Stratum，NAS），UMTS 协议结构分层如图 6-4 所示。

接入层（AS）包含了 UE 和 UTRAN 支架的无线协议（Radio Protocol）、UTRAN 和 CN 质检陆地接口协议（Iu 协议）。这些协议都终结在 UTRAN。AS 负责与接入有关的功能，可以看成是

UE 和 CN 间的传输通道,它包括嵌入接入网的所有层,与接入网相连的 UE 和 CN 的底层部分。

非接入层 (NAS) 包含了 UE 和 CN 直连的核心网协议。NAS 对于 UTRAN 是透明穿过的。非接入层协议支持功能包括: 移动管理 (MM), 呼叫控制 (CC), 短信服务, 与 CS 核心网相关的附加业务服务, GPRS 的移动管理, 与 PS 核心网相关的 GPRS 短消息服务等。

根据上面的协议分层结构, 控制软件下载到接入网的协议应该在接入层, 而控制软件下载到 UE 的协议应该在非接入层。

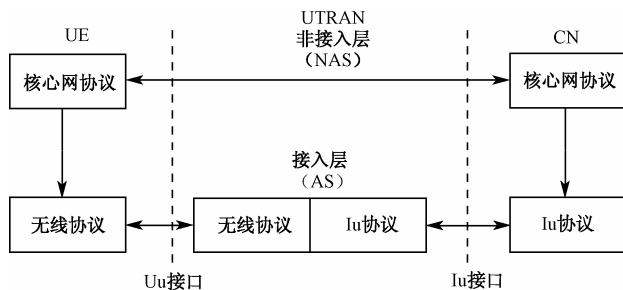


图 6-4 UTMS 协议结构分层

6.2.3 WCDMA 信道结构

WCDMA 信道类型和位置如图 6-5 所示, UE 和 UTRAN 之间的空中接口 Uu 协议层分为 3 层, 底层是物理层 L₁, 位于物理层上面的是数据链路层 L₂ 和网络层 L₃。在 WCDMA FDD 中, 数据链路层 L₂ 的控制平面上又划分为媒体接入控制 (MAC) 层和无线链路控制 (RLC) 层两个子层。

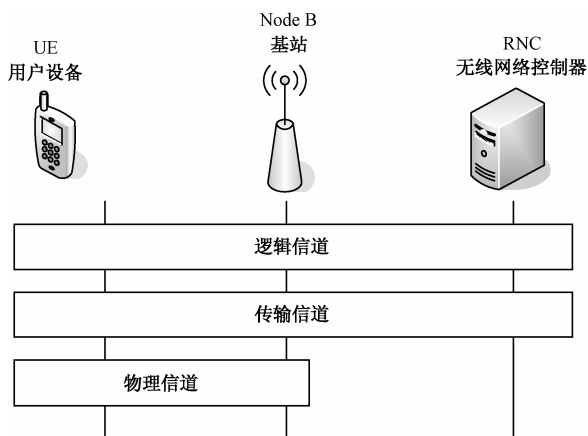


图 6-5 WCDMA 信道类型和位置

WCDMA 无线接入系统分配给用户宽带及其控制功能, 是由无线信道提供承载及交换协议来实现的。无线信道分为 3 层: PLC 和 MAC 之间的 SPA 提供逻辑信道; MAC 和 PHY 之间的 SPA 提供传输信道, 传输信道和逻辑信道都是 UE-Node B-RNC 之间的信道; 传输信道下面是物理信道, 物理信道是 UE-Node B 之间的信道。UE 和网络有不同的任务要执行, 所以逻辑信道、传输信道和物理信道在结构及方向上有一些不同, WCDMA FDD 和 TDD 的主要区别在物理层上。下面主要介绍 WCDMA FDD 的无线信道。

WCDMA 信道结构和作用明显地与 GSM 不同。根据不同的用途, WCDMA 在 Uu 接口分配了不同宽带的物理信道, 在 UE 和 Node B 之间形成了确实存在的物理信道。在 GSM 中, 物理信道和它的结构由 BSC 来识别, 而在 WCDMA 中, 物理信道在 Uu 接口处, RNC 根本不必知道它们的接口。WCDMA 的 RNC 只能看到传输信道, 而看不到物理信道。传输信道在 Uu 接口装载不同的信息流, 由 Node B 把这些信息流匹配给物理信道。逻辑信道不是真实的信道, 它们可以理解为在不同时刻, 网络和移动终端应该执行的不同任务。逻辑信道将这些不完全适合结构匹配到传输信道, 从而在 UE 和 UTRAN 之间进行实际的信息传输。另外, 传输是有方

向的,可分为单向和双向信道、上行和下行信道。上行信道是 UE 向 Node B 方向传输的信道,下行信道是 Node B 向 UE 方向传输的信道。信道还分公共信道和专用信道,公共信道是指多个 UE 可以同时使用的信道,专用信道是指 UTRAN 已在它本身和某些 UE 之间分配的信道。

6.3

CDMA2000 技术

3G 网络系统的主要追求目标是更高的比特率和更好的频谱效率。CDMA2000 是 IMT-2000 的 3 大主流技术之一。

6.3.1 CDMA2000 概述

CDMA2000 采用 CDMA 的扩频接口,其网络系统在室内环境、室内外步行环境、车载环境中,均可达到或超过 IMT-2000 的指标,室内环境下最高数据速率达 2Mbps,步行环境最高数据速率达 384kbps,车载环境最高数据速率达 144kbps,同时支持从 2G 网络系统向 3G 网络系统的演进。

1. 3G 移动通信的网络演进

CDMA2000 是从 CDMAOne 演进而来的 3G 技术,CDMA2000 标准是一个体系结构,称为 CDMA2000 Family,含有一系列的子标准,其标准由 3GPP2 制定,正式标准于 2000 年 3 月通过。CDMA 网络系统技术标准经历了从 IS-95、IS-95A、IS-95B 到 CDMA2000 建议和 IS-2000 标准的发展过程。CDMA 网络系统的演进发展过程如图 6-6 所示,并标出了大概的商用年份。为了形象化,图中采用社会和业界流传的说法,如用 2.5G、2.75G 细化了 2G 的各阶段,但 3GPP2 中没有这个说法。

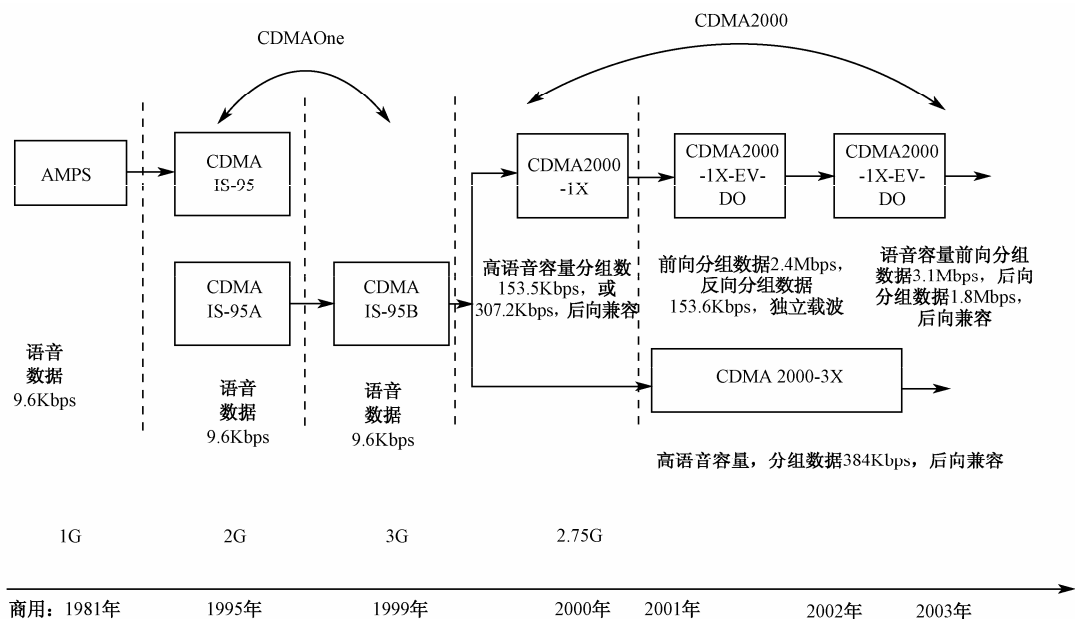


图 6-6 CDMA 网络系统演进发展过程示意图

如图 6-6 所示, 最早的 CDMA 系统空中接口标准称为 IS-95, 1993 年由美国电信工业协会 (Telecommunications Industry Association, TIA) 提出。后经多年的发展演进, 发展到 IS-95B 标准。人们将基于 IS-95 标准系列的 CDMA 系统称为 CDMAOne 系统, 它包括更多的相关标准, 如 IS-95、IS-95A、TSB-74、J-STD-008 及 IS-95B。通常将 CDMAOne 系统称为 IS-95 CDMA 系统, 而很少使用 CDMAOne 这个称呼。IS-95 系统向 3G 系统演进时, 所采用的技术体制为 CDMA2000, 这是 ITU 在制定 3G 系统空中接口标准时美国提出的技术建议。实现 CDMA2000 技术体制的正式标准名称为 IS-2000, 由美国电信工业协会制定, 并经 3GPP2 批准成为一种 3G 系统的空中接口标准。IS-2000 向下兼容 IS-95 系统。美国的 TIA/EIA (Electronics Industries Association, 电子工业协会) 与 3GPP2 主要标准的对照表如表 6-1 所示。

表 6-1 TIA/EIA 与 3GPP2 主要标准的对照表

TIA	3GPP2	内 容
IS-2000-1	C.S.0001	CDMA2000 介绍
IS-2000-2	C.S.0002	CDMA2000 物理层
IS-2000-3	C.S.0003	CDMA2000 MAC 层
IS-2000-4	C.S.0004	CDMA2000 第二层 LAC
IS-2000-5	C.S.0005	CDMA2000 第三层
IS-2000-6	C.S.0006	CDMA2000 模拟
TIA/EIA-97	C.S.0010	基站最小标准
TIA/EIA-98	C.S.0011	移动台最小性能
IS-127	C.S.0014	增强的变速省码器 (EVRA)
TIA/EIA-637	C.S.0015	短消息业务
TIA/EIA-683	C.S.0016	空中业务规定
TIA/EIA-707	C.S.0017	扩频系统的数据业务
TIA/EIA-733	C.S.0020	高速 (13kbps) 语音串行输出
IS-801	C.S.0022	定位服务
IS-95A		双模宽带扩频蜂窝系统的移动台-基站的兼容性
IS-95B		双模宽带扩频蜂窝系统的移动台-基站的兼容性

CDMA2000 可以指采用 IS-2000 标准的系统, 也可以代表空中接口所采用的技术。到目前为止, CDMA2000 的标准有 R_0 、 R_A 、 R_B 、 R_C 、 R_D 多个版本, 其中 R_0 是 CDMA2000 标准的第一个版本, 由 TIA 于 1999 年 6 月制定完成, R_0 使用 IS-95B 的开销信道, 并增加了新的业务信道和补充信道; R_A 于 2000 年 3 月由 3GPP2 制定完成, R_A 增加了新的开销信道和响应信令; R_B 于 2002 年 4 月由 3GPP2 制定完成, R_B 改动很少, 新增了补救信道 (Rescue Channel), 该信道在切换等状态下信道分配失效时, 使 MS 仍有一个最基本的信道可用, 以提供保持连接的能力; R_C 于 2002 年 5 月由 3GPP2 制定, 在 R_C 中, 前向链路增加了对 IX-EV-DV 的支持, 以提高数据吞吐量; R_D 于 2004 年 3 月由 3GPP2 制定完成, R_D 在反向链路支持 IX-EV-DV, 以提升反向链路的数据性能。

按照使用的带宽划分, CDMA2000 系统有多种工作方式。其中独立使用一个 1.25MHz 载波

的方式称为 CDMA2000-1X，将 3 个 1.25MHz 载波捆绑在一起使用的方式称为 CDMA2000-3X。

CDMA2000-1X 系统的空中接口技术也叫 1X 无线传输技术(Radio Transmission Technology, RTT)。当前，国际上的研究重点是 1X-EV (Evolution, 演进) 系统，即在 CDMA2000-1X 基础上的演进系统。1X-EV 系统分为两个阶段，即 CDMA2000-1X-EV-DO 和 CDMA2000-1X-EV-DV。DO 是 Data Only (仅数据) 或 Data Optimized (优化数据) 的缩写，1X-EV-DO 通过引入一系列新技术，提高了数据业务的性能。DV 是 Data and Voice (数据和语音) 的缩写，1X-EV-DV 同时改善了数据业务和语音业务的性能。

CDMA2000-3X 系统的空中接口技术也叫做 3X RTT，属于多载波技术。其前向链路载波通过了 3 个 1.228 8Mc/s 的直接序列扩频的单载波实现，反向链路载波通过一个 3.68Mc/s 序列扩频的单载波实现。CDMA2000-3X 是与 CDMA2000-1X 一起提出的规范，而且规范也很完善，但由于各种原因，在这个领域开展的研究非常少，厂商和运营商都没有选用这个系统，但在 AIE 中有计划进行发展。

目前，CDMA2000 系统已经在世界上多个国家和地区投入了商用，采用的都是 CDMA2000-1X 技术。

2. CDMA2000 的技术特点

CDMA2000 系列的主要技术指标如表 6-2 所示。与 CDMAOne 相比，CDMA2000 有下列技术特点。

表 6-2 CDMA2000 系列的主要技术指标

占用带宽 (MHz)	1.25	3.75	7.5	11.5	15
无线接口来源于	IS-95				
网络结构来源于	系统 IS-41				
业务演进来源于	IS-95				
最大用户数据速率 (bps)	307.2K	1.036 8M	2.073 6M	2.457 6M	
码片速率 (Mc/s)	1.228 8	3.686 4	7.372 8	11.059 2	14.745 6
帧的时长 (ms)	典型为 20ms，也可选 5ms，用于控制				
同步方式	IS-95 (用 GPS，使基站之间严格同步)				
导频方式	IS-95 (用公共导频方式，与业务码分复用)				

(1) 多种信道带宽。前向链路支持多种载波 (MC) 和直扩 (DS) 两种方式，反向链路仅支持直扩方式。当采用多种载波方式时，能支持多种载频带宽，即射频带宽可为 $N \times 1.2\text{MHz}$ ，其中 $N=1、3、5、9$ 或 12 。目前的技术仅支持前两种，即 1.25MHz (CDMA2000-1X) 和 3.75MHz (CDMA2000-3X)。

(2) 与现存的 TIA/EIA-95-B 系统具有无缝的互操作性和切换能力，可实现 CDMAOne 向 CDMA2000 系统平滑过渡演进。

(3) 核心网协议可使用 IS-41、GSM-MAP 及 IP 骨干网标准。

(4) 宽松的性能范围，可从语音到低速数据集，直到高速的分组和电路数据业务。

(5) 提供多种复合性 4E1A 务，如只传输语音、同时传输语音和数据、只传输数据和定位业务。

(6) 具有先进的多媒体服务质量 (QoS) 控制能力，支持多路语音、高速分组数据同时传输。

(7) 在同步方式上, 沿用 CDMA IS-95 方式, 采用 GPS 使基站间严格同步, 以取得较高的组网与频谱利用效率, 有效地使用无线资源。

(8) 由于采用新技术, 在提高系统性能和容量上有明显的优势, 在相同条件下, 对普通语音业务, CDMA2000 系统容量大致为 CDMA IS-95 系统的两倍。

CDMA2000 采用的新技术有: 采用 Turbo 编码, 前向发射分集, 前向和反向空中接口的快速率控制, 前向和反向采用公共连续导频方式进行相干检测, 采用辅助导频来支持波束形成应用和增加分组数据业务。

(9) 增强的 MAC 功能, 支持高效率的高速分组数据业务。

(10) 为了支持 MAC, 对物理层进行了优化, 如采用了专用控制信道, 设计了两类码复用业务信道。基本信道用于传送语音、信令和低速数据, 是一个可变速率信道; 补充信道用于传送高速率数据。在分组数据传送上应用了 ALOHA 技术, 改善了传输性能。为支持快速分组数据业务的接入控制, 采用了增强的寻呼和接入信道, 采用了可变帧长的分组数据控制信道操作 (5ms 和 20ms)。

(11) 采用短 PN 码, 通过不同的相位偏置来区分不同的小区, 采用 Walsh 码区分不同信道, 采用长 PN 码区分不同用户。

(12) 支持软切换和硬切换。

(13) 可选择较长的交换组织。

(14) 可支持多种空中接口信令, 具有灵活的信令结构。

6.3.2 CDMA2000 无线接口协议

HRPD 的空中接口定义了 7 层协议, 在每一层协议中又定义了若干协议子层。这 7 层协议由上至下分别是应用层 (Application Layer)、流层 (Stream Layer)、会话层 (Session Layer)、连接层 (Connection Layer)、安全层 (Security Layer)、媒体接入控制层 (MAC Layer) 及物理层 (Physical Layer)。详细的协议结构图如图 6-7 所示。

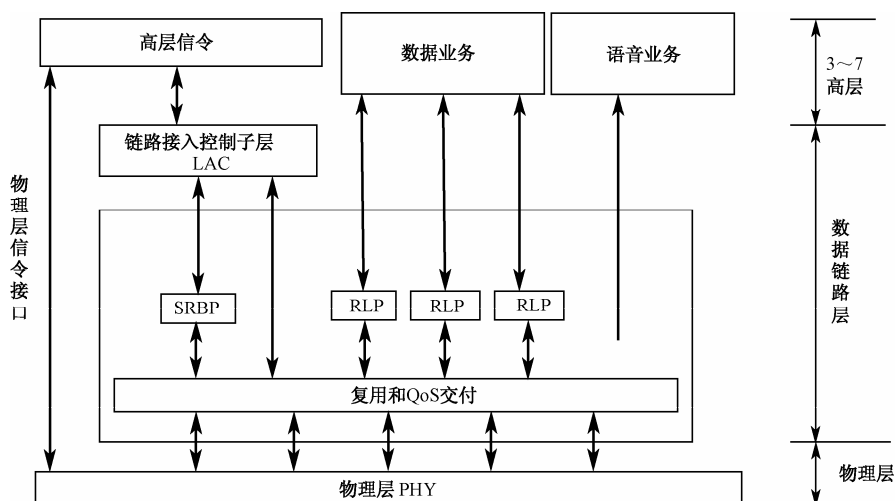


图 6-7 协议结构示意图

1. 应用层

应用层用以确保信令、分组数据的可靠性传输。在该层定义了默认信令应用和默认分组应

用两个部分。

(1) 默认信令应用 (Default Signaling Application) 包括: 信令网络协议 (Signaling Network Protocol, SNP) 和信令链路协议 (Signaling Link Protocol, SLP)。信令网络协议 (SNP) 提供信令消息的传输业务, 信令链路协议 (SLP) 提供对信令消息的分段机制和可靠、高效的发送机制, 用于承载信令网络协议数据包。

(2) 默认分组应用 (Default Packet Application) 包括: 无线链路协议 (Radio Link Protocol, RLP)、位置更新协议 (Location Update Protocol, LUP) 和流控制协议 (Flow Control Protocol, FCP)。无线链路协议 (RLP) 为数据流提供差错检测和重传; 位置更新协议 (LUP) 定义了位置更新的过程和消息, 以支持默认分组应用的移动性管理; 流控制协议 (FCP) 定义了禁止/使能默认分组数据应用的数据流控制过程。

2. 流层

流层的任务是完成不同应用的流数据复用。Stream0 专门用于信令, 默认对应于默认信令应用 (Default Signaling Application)。其他 Stream 可以分配给不同 QoS 要求的应用。流协议最多可以复用 4 个流, 在默认情况下不使用 Stream1、Stream2 和 Stream3。流层包含有流协议 (Stream Protocol), 在发送方向的数据中, 增加流头 (Stream Header); 在接收数据时, 去掉流头并将数据包发给接收实体对应的应用。

3. 会话层

会话层提供地址管理、协议协商、协议配置、状态维护业务及对终端的位置估算, 是在接入终端和接入网络之间建立起来的一个会话, 在正常情况下可以一直保持。会话层包含的协议如下。

(1) 会话管理协议 (Session Management Protocol)。该协议提供控制地址管理协议和会话配置协议的激活与去活的方式, 同时还提供会话保持激活机制。会话管理协议对本层其他两个协议的控制, 按照首先激活地址管理协议, 然后激活会话配置协议的顺序进行。

(2) 地址管理协议 (Address Management Protocol)。该协议规定了管理接入终端标识 (UATI) 的分配, 并维护终端地址的过程。

(3) 会话配置协议 (Session Configuration Protocol)。用于协商和配置在会话中使用的协议及所使用的协议配置参数。

4. 连接层

连接层负责空中链路的建立和维护, 包含的协议如下。

(1) 空中链路管理协议 (Air Link Management Protocol)。该协议提供在一个连接期间接入终端和接入网络所有状态机的管理。这个协议可以处于 3 种状态之一, 对应于接入终端是否在捕获网络 (初始化状态)、已捕获了网络但连接关闭 (空闲状态)、与接入网络有一个连接 (连接状态)。根据所处的状态, 该协议可以对应激活初始化状态协议、空闲状态协议或连接状态协议。

(2) 初始化状态协议 (Initialization State Protocol)。该协议提供接入终端 (AT) 捕获网络和接入网络 (AN), 支持网络捕获过程。

(3) 空闲状态协议 (Idle State Protocol)。该协议提供在没有打开一个连接时, 接入终端和接入网络的过程。主要是使接入网络保持对接入终端大概位置的跟踪, 以支持有效的寻呼 (使用路由更新协议)。

(4) 连接状态协议 (Connected State Protocol)。该协议提供在打开了一个连接时接入终端和接入网络的过程。主要管理接入终端和接入网络之间的无线链路及关闭连接的过程。

(5) 路由更新协议 (Route Update Protocol)。该协议提供在接入终端和接入网络之间路由维护的方法。这个协议对导频进行监控完成切换的过程。

(6) 开销消息协议 (Overhead Messages Protocol)。该协议提供包含主要由连接层协议使用的信息的广播消息。该协议通过控制信道广播基本参数, 这些参数由连接层和其他层的协议共享。

(7) 分组整合协议 (Packet Consolidation Protocol)。该协议为连接层提供优先发送和分组数据封装。

5. 安全层

安全层提供鉴权和加密业务, 包含的协议如下。

(1) 密钥交换协议 (Key Exchange Protocol)。该协议提供接入终端和接入网络为鉴权和加密过程交换密钥的过程。

(2) 鉴权协议 (Authentication Protocol)。该协议提供接入终端和接入网络应支持的鉴权过程。

(3) 加密协议 (Encryption Protocol)。该协议提供接入终端和接入网络应支持的加密过程。

(4) 安全协议 (Security Protocol)。该协议提供鉴权协议和加密协议所用 cryptosync 的产生过程。

6. 媒体接入控制层

MAC 层定义了物理层上的接收和发送过程, 包括对控制信道、接入信道、前向业务信道和反向业务信道的管理操作规则。MAC 层包含的协议如下。

(1) 控制信道 MAC 协议 (Control Channel MAC Protocol)。该协议提供接入网络发送和接入终端接收控制信道的过程。

(2) 接入信道 MAC 协议 (Access Channel MAC Protocol)。该协议提供接入终端发送和接入网络接收接入信道的过程。

(3) 前向业务信道 MAC 协议 (Forward Traffic Channel MAC Protocol)。该协议提供接入网络发送和接入终端接收前向业务信道的过程。

(4) 反向业务信道 MAC 协议 (Reverse Traffic Channel MAC Protocol)。该协议提供接入终端发送和接入网络接收反向业务信道的过程。

7. 物理层

物理层包括前向物理信道和反向物理信道。

(1) 前向信道由导频信道、媒质接入控制信道、业务信道和控制信道组成, 其中媒质接入控制信道又分为 RAB 子信道、DRCLock (数据速率控制锁定) 和反向功率控制信道。Pilot Channel 导频信道主要用于系统捕获及小区信号强度的测量; RAB 子信道用于指示接入终端 (AT) 是否增加或降低传输速率; DRCLock 信道用于指示接入网络是否能够接收接入终端发送的 DRC 请求; RPC 反向功率控制信道用于对反向链路进行功率控制; CC 卷积编码信道用于向 AT 发送一些控制消息, 其功能类似于 CDMA2000-1X 中的 Paging Channel。这些信道使用不同长度的 Walsh 码进行时分复用。

(2) 反向信道由反向接入信道和反向业务信道组成。其中反向接入信道发送反向导频信道和接入消息, 反向业务信道包括反向导频信道、MAC 信道、ACK 信道和数据信道。其中 MAC 信道包括反向速率指示信道和数据速率控制信道 (DRC), 反向速率指示信道用于指示反向业务信道的数据速率, DRC 信道用于指示请求的前向业务信道数据速率; ACK 信道用于接

入终端通知接入网是否正确收到前向业务信道发出的物理层数据包；数据信道用于发送反向业务数据。

6.4

TD-SCDMA 技术

时分同步码分多址（Time Division Synchronous CDMA，TD-SCDMA）也是 3G 采用的 5 种技术中的 3 大主流技术之一，而且对中国的移动通信更有意义。

6.4.1 TD-SCDMA 概述

1. TD-SCDMA 的产生

TD-SCDMA 的标准由中国信息产业部电信科学技术研究(China Academy of Telecommunications Technology, CATT)、大唐移动通信设备有限公司首席科学家李世鹤博士为首的团队具体制定，由中国标准化协会（China Association for Standardization, CAS）和中国无线通信标准组（China Wireless Telecommunications Standardization, CWTS）代表中国提交国际电信联盟（ITU）和第三代移动通信合作伙伴项目组织（3GPP）。在 10 种预选技术的角逐中，TD-SCDMA 于 2001 年 3 月 16 日被 3GPP 列为 3G 采用的 5 种技术中的 3 大主流技术标准之一，它与 UMTS 和 IMT-2000 的建议完全融合，其标准包含在 3GPP 的 R4 中。归属在该标准中的还有 UTRA-TDD。TD-SCDMA 现在已经发展到完成实验网运行，进入商业化组织网应用阶段，而 UTRA-TDD 研究已经处于停顿状态。

经过技术较量，由中国独立提出的通信技术标准得到了国际组织的接纳，并成为国际移动通信主流技术标准，在世界通信历史上，对中国来说还是第一次。TD-SCDMA 的诞生是中华民族的光荣，它是实实在在的民族产业，其存在的意义涵盖了中国的政治、经济和技术的发展前景。TD-SCDMA 技术将会逐步在国内和国际上得到广泛的应用。

3G 的数据传输业务包括对称的电路交换业务和非对称的分组交换业务，对称的电路交换业务如数据速率为 8kbps 的语音业务和速率高达 384kbps 的多媒体业务；非对称的分组交换业务和数据速率高达 2Mbps 的互联网业务。

2. TD-SCDMA 的特点

对语音业务和非对称互联网业务具有最高优先级。基于频分双工（FDD）的 3G 提案，如 WCDMA 和 CDMA2000 是在成对载波频带上的对称传输的模式，它们能使对称的语音和多媒体业务很好地被优化。但是，对于非对称业务，如果一个链路方向的传输速率等于另一个链路方向的传输速率，则总的频谱利用率将大大地降低。Internet 和移动业务日益融合发展的趋势，需要更新的传输模式来适应。

TD-SCDMA 的目标是要确立一个具有高频谱效率和高经济效益的先进移动通信系统，该系统被设计为不管是对称还是非对称业务，都能表现出最佳性能的系统。在 TDD 模式下，在周期性重复的时间帧里，传输基本的 TDMA 突发脉冲的工作模式（和 GSM 相同）。TDD 方案的优势在于能改变上下行链路间转换点的位置，当进行对称业务时，可在一个适当的范围内选择转换点位置。这样对称和非对称两种业务，TDD 模式都可提供最佳的频谱利用率和业务容量。

还有一种业务转换类型，这种类型要求既可以在每个突发脉冲基础上利用码分多址和联合检测技术进行多用户传输，来提供速率 8~384kbps 的语音和多媒体业务，也可以不进行信号

的扩频,来提供更高速率的数据传输业务,如移动互联的高数据率业务。这种业务转换类型中,基站收发信机(BTS)和用户设备(UE)的业务模式转换是靠软件无线电(SDR)的数字信号处理(DSP)软件来实现的。TD-SCDMA 具有高度业务灵活性,它的无线网络系统可以通过无线网络控制器(RNC)连接到支持3G的电路和分组转换业务的交换网络上,最终将可直接连接到互联网上。

TD-SCDMA 无线传输方案是 FDMA、TDMA 和 CDMA 三种基本传输技术的灵活结合应用。此外,还应用了空分多址(SCDMA)技术,这体现在智能天线与联合检测技术相结合的使用上。以上技术使 TD-SCDMA 系统降低了小区间的干扰,从而允许更为密集的频谱复用,传输容量显著增大,频谱利用率显著提高。

TD-SCDMA 系统技术解决了以下经济问题:提高了每小区/每 MHz 的数据吞吐量,使覆盖同样业务密度地区所需要的基站数最少,减少了网络建设的投资和运行维护成本;在系统运行过程中,提高了 BTS 收发信机的效率,即每个收发信机可以支持更多的信道,同时针对不同业务类型和用户位置,有的放矢地调整发射方向和发射功率,节约了功率消耗,降低了运营成本;民族工业和自主的知识产权,将给国内运营商带来长期稳定的保障和更高的投资回报,并为中国移动通信技术进入国家市场竞争赢得商机。

6.4.2 TD-SCDMA 关键技术

TD-SCDMA 的关键标准是以 3GPP 标准为基础和完全融合的,但是它所特有的关键性能,将使之成为 TURA-FDD 的补充和充分代替方案。

1. TD-SCDMA 可提供的业务

(1) 可提供电路交换的对称业务,如语音、可视会议等实时业务。

(2) 可提供具有多时隙、非对称分组数据交换业务,如视频点播、电子邮件、Internet 及 Intranet 等非实时业务。提供多元化服务业务,如 WWW 浏览、收发 E-mail、网上银行、娱乐等,以最佳性能实现无线 Internet 业务。

(3) 不受地理位置限制获得信息,具有高速下载和永远在线能力,可提供高峰值速率的数据传输能力,并可按流量计费。

(4) 在传输质量方面已由 2G 的尽力发送向服务质量(QoS)演进。

2. TD-SCDMA 的组网能力

(1) TD-SCDMA 的网络系统支持各种无线网络结构,以满足宏区、微区和微微区不同的覆盖和用户密集度要求。

(2) TD-SCDMA 核心网络基于 GSM/GPRS 网络的演进,并保持与它们的兼容,TD-CDMA 支持多种通信接口,与 WCDMA 接口 Iu、Iub、Iur 等多种接口相同,可以单独组网或作为接入网和 WCDMA 混合组网。

(3) TD-SCDMA 的信号带宽为 1.23MHz,码片速率为 1.28Mc/s,由于采用 TDD 方式,所以频谱利用率远远高于采用 FDD 方式的其他 3G 技术,仅需单载波 1.6MHz 的频带就可提供速率达 2Mbps 的 3G 业务。由于不需要使用成对的载波频段,并可以在单载波较窄频带上应用 TD-SCDMA 技术组网,使频率规划灵活,频谱利用更充分,还可使用多载波技术,在一个小区内提供极大的容量。

3. TD-SCDMA 使用多种关键新技术

(1) 采用了智能天线技术和联合检测技术;在上行链路采用了同步 CDMA 技术,来降低

上行链路用户间的干扰和保持时隙宽度；BTS 之间采用 GPS 或网络同步方式，在下行链路中，有效地降低 BTS 间的干扰，系统容量和频谱利用率进一步提高。

(2) 比其他 3G 系统更多、更早地使用软件无线电技术, 为今后发展建立无缝连接网络, 解决多频、多模式、多业务的终端和基站建设问题打下良好的基础。

(3) 采用接力切换, 降低了掉话率, 提高切换的效率。

6.4.3 TD-SCDMA 系统结构与空中接口技术

TD-SCDMA 是对 UTRA-TDD 的融合和补充, 都属于 IMT-2000 CDMA-TDD 标准。

1. 系统结构

TD-SCDMA 移动通信系统网络结构与 3GPP 制定的通用移动通信系统 (UMTS) 的网络结构一样, 如图 6-8 所示, 包括用户设备 (UE)、无线接入网 (UTRAN) 和核心网 (CN), 以及相关的网络系统结构、系统实体及功能、接口和有关主要协议, 协议栈的分层和平面划分、网络同步等内容。

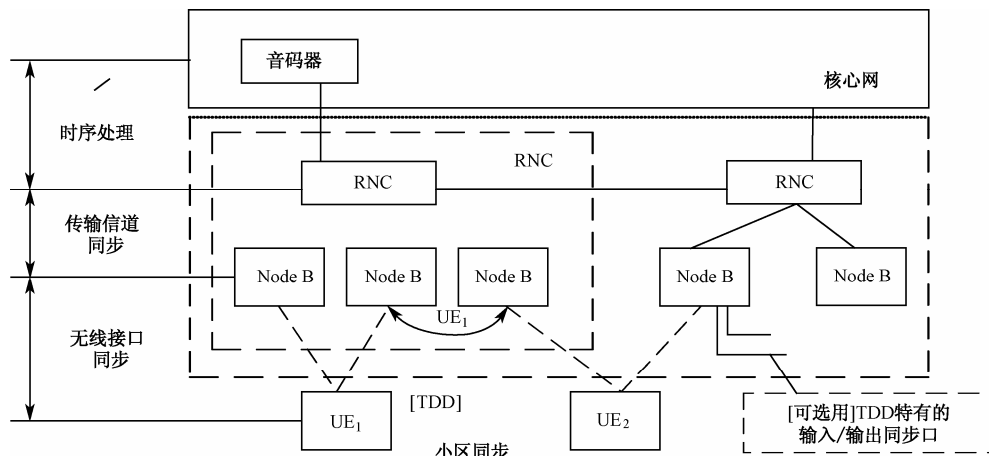


图 6-8 网络同步模型

网络同步包括系统同步、节点间同步、传输信道同步、无线接口同步和定时对齐控制。对于 TDD 系统来说,系统同步是极为重要的,它直接关系到整个网络的性能好坏。在现在的 3GPP 标准中,同步主要是通过传输线同步和 GPS 来完成的。TDD 系统除了以上两种方式外,还采用了空中接口的同步方式。其中,3.84Mcps/UTRA-TDD 专门提供了一条用来进行空中接口同步的物理信道 PNBSCH,而 TD-SCDMA 由于其特殊的帧结构,通过专用下行导频时隙(Downlink Pilot Time Slot, DwPTS)来完成空中接口同步功能。

2. 空中接口技术

3G 的 3 大主流技术主要区别在于物理层的空中接口技术。TD-SCDMA 系统的空中接口 (Uu) 协议结构分为 3 层, 即物理层 L_1 、数据链路层 L_2 和高层 L_3 。其中 L_2 又分为媒体接入子层 L_2/MAC 和无线链路控制子层 L_2/RLC , 高层 L_3 对应 OSI 的 3~7 层, L_3 包含无线资源控制 (RRC) 和非接入层 NAS 的网络协议。从不同协议分层来讲, 承载用户各种业务的信道分为 3 类, 即逻辑信道、传输信道和物理信道。逻辑信道在 L_2/RLC 和 L_2/MAC 之间, 它表述承载的任务和业务类型, 逻辑信道根据任务是属于控制平面的还是属于用户平面的分成两大类, 即控制信道和业务信道; 传输信道在 L_2/MAC 和 L_1 之间, 它承载逻辑信道的内容, 表述逻辑信道

的内容是怎样在空中接口传输的,物理层用传输信道对 MAC 层提供服务,按传输的内容是为了一个用户专用信息还是为所有用户共用信息,传输信道分为专用信道和公用信道两大类;物理信道在物理层 L_1 中,是由一些上行和下行信道组成的,物理信道承载传输信道的内容,将传输信道的内容变换为适合在空中接口传输的形式进行传输,每一种用特定的载波频率、扩展码及时隙的信道都可以理解为一类特定的物理信道。在逻辑信道和传输信道之间,传输信道和物理信道之间都有特定的映射关系。

6.4.4 3 种主流 3G 技术标准比较

3G 系统的 3 大主流技术标准(制式)在技术上各自具备不同特征,3G 三大主流技术标准的对比如表 6-3 所示。

表 6-3 3G 三大主流技术标准的对比

制 式	WCDMA	CDMA2000	TD-SCDMA
网络基础	GSM	窄带 CDMA	GSM
空中接口	WCDMA	CDMA2000 兼容 IS-95	TE-SCDMA
核心网	GSM MAP	ANSI-41	GSM MAP
载频间隔	5GHz	1.25MHz 整数倍	1.6MHz
信道带宽	5/10/20MHz	1.25/5/10/15/20MHz	$N \times 1.6\text{MHz}$
扩频方式	单载波直扩 DS	多载波 MC 和直扩 DS	多载波 MC 和直扩 DS
扩频因子	4-512	4-256	1-16
双工方式	FDD/TDD	FDD	TDD
码片速率	3.84Mc/s	1.228 8Mc/s	1.28 Mc/s
基站间同步	异步(不需 GPS)或同步(需 GPS)	同步(需 GPS)	同步(主从同步,需 GPS)
帧长	10ms	20ms	10ms
调制方式(上行/下行)	QPSK/BPSK	QPSK/BPSK	接入信道: OQPSK、8PSK
上行信道结构	导频 TPC/业务信道/信令/分组业务码时分复用	导频/控制信道/基本信道补充信道码时分复用	导频 TPC/业务信道/信令/分组业务码时分复用
同步检测(上行/下行)	与导频信令相干(导频 IQ 复用)	与导频信道相干	与(下行/上行)导频时隙相干
切换	软切换	软切换	接力切换
功率控制速度	1 500Hz	800Hz	200Hz
下行信道导频	公共导频和专用导频(采用导频符号,与其他数据和控制信息时分复用 TDM)	公共导频信道(与其他业务和控制信道码分复用 CDM)	特殊时隙: 下行导频信道 DwPTS
上行信道导频	导频符号和 TPC 一级控制数据信息时分复用和 I/Q 复用	各信道间码分复用(有反向导频码信道)	特殊时隙: 下行导频信道 UpPTS
语音编码	自适应多速率语音编码器(AMR)	可变速率声码器 IS-773、IS-127	自适应多速率语音编码器(AMR)
业务信道编码	卷积码,码率 1/2 或 1/3,约束长度 $K=9$,高速用 Turbo 码	卷积码,码率 1/4、1/3 和 1/2,约束长度 $K=9$,高速用 Turbo 码	卷积码,码率 1/2 或 1/3,约束长度 $K=9$,高速用 Turbo 码

续表

制 式	WCDMA	CDMA2000	TD-SCDMA
控制信道编码	卷积码, 码率 1/2, 约束长度 $K=9$	前向: 卷积码, 码率 1/4, 约束长度 $K=9$; 反向: 卷积码, 码率 1/2, 约束长度 $K=9$, 高速用 Turbo 码	卷积码, 码率 1/2 或 1/3, 约束长度 $K=9$, 高速用 Turbo 码
扩频码=信道化码+扰码	下行: OVSF+Gold (区别小区) 上行: OVSF+Gold (区别用户)	前向: Walsh+M215 (区别小区) 后向: Walsh+M241-1 (区别用户)	下行: OVSF+PN (区别小区) 上行: OVSF (区别信道和用户)

6.5

B3G 与 4G 移动通信系统

B3G (Beyond Third Generation in Mobile Communication System), 即超三代移动通信系统。4G 是集 3G 与 WLAN 于一体, 并能够传输高质量视频图像的通信系统。

6.5.1 B3G 移动通信系统

B3G 通信从 20 世纪末 3G 技术完成标准化之时就开始了。2006 年, ITU-R 正式将 B3G 技术命名为 IMT-Advanced 技术 (3G 技术名为 IMT-2000)。根据原定的工作计划, IMT-Advanced 的标准化已经“近在眼前”。ITU-R 是在 2008 年 2 月发出通函, 向各标准化组织征集 IMT-Advanced 技术提案。IMT-Advanced 技术需要实现更高的数据速率和更大的系统容量, 目标峰值速率为: 低速移动、热点覆盖场景下 1Gbps 以上; 高速移动、广域覆盖场景下 100Mbps 以上。

从 3G 演进的路线来看, GSM/WCDMA 的 B3G 发展, 首先是实现 HSDPA (P1) R5, 上行和下行速率分别达到 1.8Mbps 和 3.6Mbps; 其次是实现 HSDPA (P2) R6 和 HSUPA, 上行和下行速率分别达到 8Mbps 和 14.4Mbps。

GSM/TD-SCDMA 的进展也非常迅速, 其后续技术的演进路线已经十分清晰。首先会采用单载波的 HSBTA 技术, 速率会达到 2.8Mbps, 然后采用多载波的 HSBTA, 速率会达到 7.2Mbps, 并逐步提高它的接入能力。

CDMA/CDMA2000-1X 的发展演进和 WCDMA 及 TD-SCDMA 略有不同, 由于基础信道带宽的不同, 首先实现的是 CDMA2000-1XEV-DOR0, 其上行和下行速率分别达到 153.6kbps 和 2.46Mbps; 其次实现的是 1XEV-DORA 和 1XEV-DV, 上行和下行速率分别达到 1.6kbps 和 3.1Mbps 及 3 倍的 1XEV-DO 速率。

从技术发展的角度看, B3G 移动网络的演进必将走多元化路线。B3G 系统将能够应对越来越复杂和多样化的通信环境, 以保证各种网络之间的不间断服务。ITU 的 B3G 标准化工作分为两大部分。一部分是由 ITU-R 的 WP8F 负责, 另一部分是由 ITU-T 的 SG19 负责。ITU-RWP8F 的主要任务是负责 3G 的未来发展和 B3G 的标准化研究工作。通过 B3G 业务与市场分析报告、频谱估计报告、新技术报告等, 在 WRC-07 上提出 B3G 的频谱分配方案和形成 ITU 的 B3G 建议等, 其 B3G 标准化研究工作进展非常顺利; ITU-TSG19 主要负责在核心网层

面进行相应的标准制定工作,其工作相对不活跃。ITU-RWP8F 的核心工作是在 WRC-07 之前,完成 BeyondIMT-2000 的频谱计算方法、业务分析、频谱需求量分析、频谱规划等。ITU-RWP8F 完成了 B3G 的愿景文件以后,已经开始了具体的研究工作。

6.5.2 4G 移动通信系统

4G 集 3G 与 WLAN 于一体,能够传输高质量视频图像,它的图像传输质量与高清晰度电视不相上下。

1. 4G 移动通信系统概念

4G 系统能够以 100Mbps 的速率下载,比目前的拨号上网快 2 000 倍,上传的速率也能达到 20Mbps,能够满足几乎所有用户对于无线服务的要求。在用户最为关注的价格方面,4G 与固定宽带网络不相上下,而且计费方式更加灵活机动,用户完全可以根据自身的需求确定所需的服务。此外,4G 可以在 DSL 和有线电视调制解调器没有覆盖的地方部署,然后再扩展到整个地区。很明显,4G 有着不可比拟的优越性。

国际电信联盟 (ITU) 已经正式纳入的 4G 标准主要有 LTE 和 WiMax,后来 HSPA+也纳入到 4G 标准中,LTE 继续向后演进成 LTE-Advanced。

第四代移动通信系统可称为广带 (Broadband) 接入和分布网络,具有非对称的超过 2Mbps 的数据传输能力,数据率超过 UMTS,是支持高速数据率 (2~20Mbps) 连接的理想模式,上网速率从 2Mbps 提高到 100Mbps,提高到超过第三代移动技术 50 倍,具有不同速率间的自动切换能力。第四代移动通信系统是多功能集成的宽带移动通信系统,在业务、功能、频带上都与第三代系统不同,会在不同的固定和无线平台及跨越不同频带的网络运行中提供无线服务,比第三代移动通信更接近个人通信,可实现三维图像高质量传输。4G 移动通信技术的信息传输级数要比 3G 移动通信技术的信息传输级数高一个等级。对无线频率的使用效率比第二代和第三代系统都高得多,且抗信号衰落性能更好。除了高速信息传输技术外,它还包括高速移动无线信息存取系统、安全密码技术及终端间通信技术等,具有极高的安全性,4G 终端还可用于定位、告警等。

4G 系统可以自动管理、动态改变自己的结构,以满足系统变化和发展的要求。用户可能使用各种各样的移动设备接入到 4G 系统中,各种不同的接入系统结合成一个公共的平台,它们互相补充、互相协作,以满足不同的业务要求,移动网络服务趋于多样化,最终会演变为社会上多行业、多部门、多系统与人们沟通的桥梁。

2. 4G 通信系统的主要优势

如果说 2G、3G 通信对人类信息化的发展是微不足道的话,那么未来的 4G 通信会给人们真正的沟通自由,并彻底改变人们的生活方式甚至社会形态。在 2009 年构思中的 4G 通信具有以下特征。

1) 通信速度快

人们研究 4G 通信的最初目的是提高蜂窝电话和其他移动装置无线访问 Internet 的速率,因此 4G 通信给人们的印象最深刻的特征莫过于它具有更快的无线通信速度。以移动通信系统数据传输速率来比较,第一代模拟式仅提供语音服务;第二代数位式移动通信系统传输速率也只有 9.6kbps,最高可达 32kbps,如 PHS;而第三代移动通信系统数据传输速率可达 2Mbps;专家预估,第四代移动通信系统可达到 10~20Mbps,甚至最高可达 100Mbps,这种速率相当于 2009 年最新手机传输速率的 1 万倍左右。

2) 网络频谱更宽

要想使 4G 通信达到 100Mbps 的传输速率, 通信运营商必须在 3G 通信网络的基础上进行大幅度的改造和研究, 以便使 4G 网络在通信带宽上比 3G 蜂窝系统的带宽高出许多。据说每个 4G 信道会占有 100MHz 的频谱, 相当于 W-CDMA 3G 网络的 20 倍。

3) 通信更加灵活

4G 手机的功能已不能简单划归“电话机”的范畴了, 毕竟语音资料的传输只是 4G 移动电话的功能之一, 因此未来 4G 手机更像一个小型电脑。4G 手机的外观会有更惊人的突破, 人们想象的眼镜、手表、化妆盒、旅游鞋, 以方便和个性为前提, 任何一件能看到的物品都有可能成为 4G 终端。未来的 4G 通信使人们不仅可以随时随地通信, 更可以双向下载传递资料、图画、影像, 当然更可以和陌生人网上连线对打游戏。也许有被网上定位系统永远锁定无处遁形的苦恼, 但是与它提供的地图带来的便利和安全相比, 这简直可以忽略不计。

4) 智能性更高

第四代移动通信的智能性更高, 不仅表现在 4G 通信终端设备的设计和操作具有智能化, 如对菜单和滚动操作的依赖程度会大大降低, 更重要的是 4G 手机可以实现许多难以想象的功能。如 4G 手机能根据环境、时间及其他设定的因素来适时地提醒手机的主人此时该做什么事, 或者不该做什么事; 4G 手机可以把电影院票房资料直接下载到 PDA 上, 这些资料能够把售票、座位等情况信息显示得清清楚楚, 您可以根据这些信息在线购买自己满意的电影票; 4G 手机可以看做一台手提电视, 可用来观看体育比赛之类的各种现场直播。

5) 兼容性能更平滑

要使 4G 通信尽快地被人们所接受, 不但要考虑它的功能强大, 还应考虑到现有通信的基础, 以便让更多的现有通信用户在投资最少的情况下就能很轻易地过渡到 4G 通信。因此, 从这个角度来看, 未来的第四代移动通信系统应当具备全球漫游、接口开放、能与多种网络互连、终端多样化及能从第二代平稳过渡等特点。

6) 提供各种增值服务

4G 通信并不是从 3G 通信的基础上经过简单的升级而演变过来的, 它的核心技术是根本不同的, 3G 移动通信系统主要以 CDMA 为核心技术, 而 4G 移动通信系统技术则以正交多任务分频技术 (OFDM) 最受瞩目。利用这种技术, 人们可以实现无线区域环路 (WLL)、数字音频广播 (DAB) 等方面的无线通信增值服务。不过考虑到与 3G 通信的过渡性, 第四代移动通信系统不会在未来仅仅只采用 OFDM 一种技术, CDMA 技术会在第四代移动通信系统中与 OFDM 技术相互配合, 以便发挥出更大的作用, 甚至未来的第四代移动通信系统也会有新的整合技术产生, 如 OFDM/CDMA、OFDM/FDMA (用于数字音频广播) 等, 是多种技术的整合。因此未来以 OFDM 为核心技术的第四代移动通信系统, 也会结合两项技术的优点, 一部分会是 CDMA 的延伸技术。

7) 实现更高质量的多媒体通信

尽管第三代移动通信系统也能实现多媒体通信, 但未来的 4G 通信系统能达到第三代移动通信尚不能达到的效果, 例如在覆盖范围、通信质量、造价上支持的高速数据和高分辨率多媒体服务的需要。第四代移动通信系统提供的无线多媒体通信服务包括语音、数据、影像等大量信息透过宽频的信道传送出去, 为此, 未来的第四代移动通信系统也称为“多媒体移动通信”。第四代移动通信不仅是为了满足用户数的增加, 更重要的是必须满足多媒体的传输需求, 当然还包括通信品质的要求。总之, 首先必须可以容纳市场庞大的用户数, 改善现有通信品质不良,

以及达到高速数据传输的要求。

8) 频率利用效率更高

相比第三代移动通信技术来说,第四代移动通信技术在开发研制过程中,使用和引入许多功能强大的突破性技术,例如一些光纤通信产品公司,为了进一步提高无线因特网的主干带宽宽度,引入了交换层级技术,这种技术能同时涵盖不同类型的通信接口,也就是说4G主要是运用路由技术(Routing)为主的网络架构。由于利用了几项不同的技术,所以无线频率的使用比第二代和第三代系统有效得多。按照最乐观的情况估计,这种有效性可以让更多的人使用与以前相同数量的无线频谱做更多的事情,而且做这些事情的时候速度相当快。据研究人员透露,信息下载速率有可能达到5~10Mbps。

9) 通信费用更加便宜

由于4G通信不仅解决了与3G通信的兼容性问题,让更多的现有用户能轻易地升级到4G通信,而且4G通信引入了许多尖端的通信技术,这些技术保证了4G通信能提供一种灵活性非常高的系统操作方式,因此相对其他技术来说,4G通信部署起来就迅速得多;同时在建设4G通信网络系统时,通信运营商会考虑直接在3G通信网络的基础设施上,采用逐步引入的方法,这样就能够有效地降低运行者和用户的费用。据研究人员宣称,4G通信的无线即时连接等业务,其服务费用会比3G通信更加便宜。

6.6

双网双待基础

“双网双待”也可以通俗地称为“双模双待”、“一机两网”。简单地说,就是一部手机里可以同时使用两张卡,相当于两部手机的功能。

6.6.1 双网双待的概念

据专业人士介绍,由于各国管制政策的不同,存在多种通信频段,因此导致用户需要在不同的技术标准和不同的通信频段之间频繁切换,全球畅通的梦想一直难以实现。比如,日本和韩国主要采用CDMA标准,GSM用户无法实现直接漫游;而欧洲则采用GSM标准,CDMA用户无法实现直接漫游。在双网双待手机面市之前,这个问题一直是“国际人”心中无法解决的苦恼。双网双待手机通过创新技术,成功解决了用户在G网和C网之间的自由切换、号码保留等难题,实现了“一机双网,同时在线,一机在手,全球畅行”。

新近上市的8款双网双待手机分别为:酷派728B、三星W579、大显C8000、酷派288、中兴H500、海信D806、中电C828、UT斯达康UT66。这8款双网双待手机的最大特点是一部手机内可同时放置GSM和CDMA两张卡,移动用户使用时,这部手机中的两个手机号码可同时处于开机状态,用其中任何一个号码均能拨打、接听和收发短信,解决了以前的两部手机携带不便及双模手机不能同时在线,只能人工切换的缺陷,同时还避免了用户的换号成本。

6.6.2 双网双待与双卡双待

什么是双网双待手机?双网双待又称双模双待,是指同一部手机同时支持两个不同网络制

式,如同时支持 GSM 和 CDMA。目前市场上双网双待手机主要指同时支持 GSM 网络和 CDMA 网络的手机,另外有同时支持 CDMA 和 PHS 的手机,同时支持 GSM 和 PHS 的手机。

在双网双待手机里,两张属于不同网络制式的手机卡可以同时处于开机状态,这意味着消费者再也不用在口袋里装着两部手机了。只要持有一部双网双待手机,一切都变得简单、方便、高效。双网双待手机实际上是属于广义上的“双卡双待”手机的一种。在其他功能一致的情况下,双网双待手机成本要比双卡双待手机成本高。

什么是双卡双待手机?双卡双待是指一部手机可以同时装下两张 SIM 卡,并且这两张卡均处于待机状态。市场上的双卡双待一般指同一种网络制式的双卡双待,即 GSM 网络双卡双待、CDMA 网络双卡双待、PHS 网络双卡双待;双卡双待主要指第一种情况,即 GSM 双卡双待。目前,市场上 CDMA 和 PHS 制式的双卡双待手机比较少,甚至几乎没有。

简单地说,消费者使用 GSM 双卡双待手机,可以在一部手机上同时使用两个 GSM 网络的手机号;使用 CDMA 双卡双待手机,可以同时使用两个 CDMA 网络的手机号。

双卡双待手机一般可以设置为以下几种情况:①仅 SIM1 卡开;②仅 SIM2 卡开;③双卡开。有了双卡双待手机,那么“忙人”就不用再手里拿着两个手机了,简单而方便。在中国电信业处于寡头垄断的市场格局下,双卡双待的产生极大地方便了往返各地的商务人士,并极大地降低了通信漫游成本。

6.7

习题

1. 填空题

(1) 移动通信技术已从 _____、_____, 现已发展为第三代蜂窝移动通信系统。由于第三代移动通信系统的 _____ 也接近 3GHz, 因此将这种通信系统简称 3G 通信系统。

(2) WCDMA 的全称是宽带码分多址, 也称 _____。

(3) 4G 是集 _____ 于一体, 能够传输高质量视频图像, 它的图像传输质量与 _____ 不相上下。

(4) TD-SCDMA 无线传输方案是 _____、_____ 和 _____ 3 种基本传输技术的灵活结合应用。

(5) 双卡双待是指 _____, 并且这两张卡均处于待机状态。

(6) 双网双待也可以通俗地称为 _____、“一机两网”。简单地说, 就是一部手机里可以 _____, 相当于两部手机的功能。

2. 是非判断题 (正确画√, 错误画×)

(1) 双网双待手机就是双卡双待手机。 ()

(2) 4G 系统能够以 100Mbps 的速率下载, 比目前的拨号上网快 2 000 倍, 上传的速率也能达到 20Mbps, 能够满足几乎所有用户对于无线服务的要求。 ()

(3) 第四代移动通信不仅是为了满足用户数的增加, 更重要的是必须满足多媒体的传输需求, 当然还包括通信品质的要求。 ()

3. 选择题（将正确答案的序号填入括号内）

(1) WCDMA 标准最初提出者是（ ），后来与日本的 W-CDMA 技术融合，成为 ITU 制定 3G 五种技术中的三大主流技术之一，即 IMT-2000 CDMA-DS。

- A. 欧洲电信标准组织 B. ITU-T
C. 韩国 D. 日本

(2) CDMA2000 是从（ ）演进而来的 3G 技术。

- A. CDMAOne B. 2G C. B3G D. 4G

(3) WCDMA、CDMA2000、TD-SCDMA 是（ ）的 3 大主流标准。

- A. 因特网络系统 B. 3G 系统
C. 光纤系统 D. 电视广播系统

4. 简答题

- (1) 4G 通信系统的主要优势有哪些？
- (2) 为什么第四代移动通信系统也称为“多媒体移动通信”？
- (3) 与其他通信方式相比，TD-SCDMA 的特点有哪些？
- (4) TD-SCDMA 可提供的业务有哪些？
- (5) TD-SCDMA 的组网能力体现在哪些方面？
- (6) TD-SCDMA 使用了哪些关键新技术？

5. 画图题

画出 TD-SCDMA 移动通信系统网络结构图，说明各组成部分的用途。



调研项目：我国 3G 技术的发展与现状



调研目的：

1. 通过调研，了解我国 3G 移动通信技术的总体发展过程及现状。
2. 了解目前我国 3G 移动通信技术水平及其建网状况。
3. 加深对 3G 移动通信技术的认识，了解 3G 的 3 大主流技术的区别与联系。



调研要求：

1. 在调研的基础上，要按统一要求格式撰写 5 000 字左右的《关于我国 3G 移动通信技术的总体发展过程及现状》调查研究报告。
2. 调研资料要真实、可靠，论证要清晰、准确。报告中，在简述我国 3G 移动通信技术的发展历程的基础上，重点阐述当前我国移动通信的应用技术及其影响，最后简要介绍 4G 发展情况。

**提示:**

可利用图书馆、互联网等查阅有关资料，在有条件的情况下，可到有关科研院所、企业、公司进行调研。

实验 6 GPRS 模块主叫通话实验

**实验目的:**

1. 了解 GPRS 基本原理。
2. 了解 GPRS 无线通信模块（又称 GPRS MODEM 或 GSM/GPRS 模块）的基本知识。
3. 了解 AT 指令基本知识。
4. 掌握 GPRS 无线通信模块的使用。

**实验内容:**

通过对 GPRS 模块输入 AT 指令实现 GPRS 模块的主叫通话。

**基本方法:**

1. GPRS 基础知识

移动通信是当前发展最快、应用最广和最前沿的通信领域之一。通常把移动通信分为 3 代：第一代是模拟的无线网络（1G）；第二代是窄带数字通信（2G），包括 GSM、CDMA（IS-95）等；第三代是宽带数字通信（3G），包括 WCDMA、CDMA2000 及 TD-SCDMA 等，支持分组型的业务。GPRS 是介于第二代和第三代之间的一种技术，通常称为 2.5G，目前通过升级 GSM 网络实现。称为 2.5G 是比较恰当的，因为它是一个混合体，采用 TDMA 方式传输语音，采用分组的方式传输数据。

GPRS 是通用分组无线业务（General Packet Radio Service）的英文简称，是在现有的 GSM（全球移动通信系统）上发展出来的一种新的分组数据承载业务。GPRS 是欧洲电信协会 GSM 系统中有关分组数据所规定的标准，它可提供高达 115kbps 的空中接口传输速率。

相对原来 GSM 的拨号方式的电路交换数据传送方式，GPRS 是分组交换技术，具有“实时在线”、“按量计费”、“快捷登录”、“高速传输”、“自如切换”的优点。

GPRS 无线通信模块支持 GPRS 方式访问互联网，以 GSM 方式实现语音通话、短消息和收发传真。

移动技术的发展带来了网络、终端、应用类型和客户群等各方面的变化和发展。从网络的角度看, GPRS 在传统的无线系统基础上引入了 IP 核心网络, 以处理高速数据业务; 从应用角度看, GPRS 系统支持大量数据类业务, 如移动商务、内容服务、无线游戏等; 作为支持终端, 则要求处理能力、用户界面相应增强, 从而为商业用户或其他特定用户群的最终用户提供灵活、高速的数据业务。

2. GPRS 移动终端的分类

为满足未来用户的需要, GPRS 定义了 3 种不同的移动终端类别, A 类 (Class A)、B 类 (Class B) 和 C 类 (Class C)。

A 类的 GPRS 移动终端可同时使用 GSM 电路交换服务和 GPRS 服务。用户可在通话的同时, 通过 GPRS 链路收发数据。A 类的移动终端还允许传统 GSM 服务和 GPRS 服务的同时接入、激活和监控。

B 类的 GPRS 移动终端允许传统 GSM 业务和 GPRS 业务的同时接入、激活和监控。但不允许 GSM 和 GPRS 服务同时进行数据传输。例如, 一个用户建立了 GPRS 数据连接, 并且正在发送或接收数据包。这时, 用户移动终端收到了一个来话指示, 并且接听了该呼叫。当用户正在通话时, GPRS 虚拟连接被“挂起”或“示忙”, 不可能用于数据传输。用户通话结束后, 该 GPRS 虚拟连接才可能继续传输数据 (本设备应用的 GPRS 终端为 B 类)。

C 类的 GPRS 移动终端是一个纯粹的 GPRS 终端 (只能支持 GPRS), 或者既可支持 GSM 电路交换服务, 也可支持 GPRS。后一种情况下, 该移动终端必须在 GSM 和 GPRS 两种模式之间来回切换: 当切换至 GPRS 模式下时, 用户可使用该终端发起或接收 GPRS 呼叫, 但不能用其发起或接收 GSM 呼叫; 同样, 切换至 GSM 模式下时, 用户可使用该终端发起或接收 GSM 呼叫, 但不能用其发起或接收 GPRS 呼叫。

3. GPRS 的应用

(1) 横向应用。横向应用的特点是直接面向消费者, 如 WWW 浏览、邮件收发及 QQ 聊天等。

(2) 纵向应用。纵向应用的特点是面向集团和企业, 如信用卡确认 (POS), 保安系统 (电子监控), GPS 自动定位跟踪业务 (运钞车定位跟踪), 电子商务, 电子银行, 远程商务洽谈, 石油、天然气管道监测系统, 气、水、电等远程读表, 股票交易, 仓库等要地的监控系统, 调度系统, 车队、船舶等的调度管理。



实验方法:

1. 课前仔细阅读实验指导书, 掌握移动通信 GPRS 设备的面板结构, 了解有关测量仪器的使用方法。
2. 根据实验指导书的说明, 结合实验设备, 在老师的指导下, 进行实验数据的测量。
3. 注意实验过程中观察到的现象, 做好记录, 并进行分析。









实验报告内容:

1. 简述 GPRS 基本原理及特点。
2. 简述 GPRS 模块调试工具的 AT 指令操作方法。
3. 简述 GPRS 模块的主叫过程。

>>> 第7章

GPS 定位测量原理与实施

-  7.1 GPS 概述
-  7.2 GPS 定位坐标系统和时间系统
-  7.3 GPS 定位原理
-  7.4 GPS 测量技术设计与外业施测
-  7.5 GPS 定位测量技术应用
-  7.6 习题

全球定位系统（Global Positioning System, GPS）是 20 世纪 70 年代由美国国防部研制的新一代卫星导航定位系统，该系统可向人类提供高精度的导航、定位和授时服务。这标志着 GPS 系统已从最初的取代常规大地测量和工程测量，发展渗透到了精密工程测量、地籍测量、地形测量、航空摄影测量、地质调查、交通管理、地理信息系统、海洋测绘、气象预报、变形监测和地球科学等领域。尤其是差分 GPS（DGPS）和相位差分 GPS（RTK）技术的应用，实现了高精度实时动态导航与定位，在瞬间可获得米级或厘米级精度的测量坐标。

7.1

GPS 概述

GPS 全球定位系统是美国国防 U.S.Department of Defense（DOD）为满足军事部门对海上、陆地和空中设施进行高精度导航和定位的要求而建立的，结合美国海军的“Timation”计划和美国空军的“621-B”计划而研制，这两个计划在 20 世纪 60 年代中期就已经确定，要用测距的方式来发展一种被动导航系统。

7.1.1 卫星定位技术发展概况

卫星定位导航系统是美国国防部始建于 1973 年，经过方案论证、工程研制和生产作业 3 个阶段，历经 20 余年，耗资 300 多亿美元于 1994 年全部建成的。

GPS 作为继子午卫星系统发展起来的新一代卫星导航与定位系统,具有全球性、全天候、连续等优点的三维导航和定位能力,具有良好的抗干扰性和保密性。它已成为美国导航技术现代化的重要标志,被视为 20 世纪美国继阿波罗登月计划和航天飞机计划之后的又一重大科技成就。

现代测量领域早就开始采用 GPS 技术,最初主要用于建立各种类型和等级的测量控制网。目前 GPS 技术除了仍大量用于这些方面外,在测量领域的其他方面也得到了充分的应用,例如用于各种类型的施工放样、测图、变形观测、航空摄影测量、海测和地理信息系统中地理数据的采集等。尤其在各类测量控制网的建立, GPS 定位技术已基本上取代了常规测量手段,成为目前主要的技术手段。

在中国,1997 年由国家测绘局完成了 A 级、B 级网的布设与平差,全网由 756 点组成,其中 A 级网 27 点,基线水平方向相对精度为 2×10^{-8} ,垂直分量相对精度 7×10^{-8} 。布设 A 级网的目的,是在全国范围内确定精确的地心坐标,建立起我国新一代地心参考框架及其与国家坐标系的转换参数,作为高精度卫星大地网的骨架,并奠定地壳运动及地球动力学研究的基础。作为我国高精度坐标框架的补充以及为满足国家建设的需要,在国家 A 级网的基础上,又建立了国家 B 级网。经整体平差后,点位地心坐标精度达到 $\pm 0.1\text{m}$,B 级点基线水平分量精度优于 4×10^{-7} ,垂直分量精度优于 8×10^{-7} 。新布设的国家 A、B 级网已成为我国现代大地测量和基础测绘的基本框架。

1998 年,由总参测绘局完成了一级网与二级网的布设与平差,全网共 534 点(其中一级网 44 点),均匀分布于全国(除中国台湾省外)。由异步环计算的相对误差,一级网为 3×10^{-8} ,二级网 60%以上为 1×10^{-8} ,其他为 $(1 \sim 2) \times 10^{-7}$ 。1997 年由中国地震局、总参测绘局、中国科学院、国家测绘局开始建立的全国 GPS 控制网,由 25 个基准站、56 个基本站、1 000 个区域网点组成。基准站间基线测定精度为 2mm,基本站间基线测定精度水平分量为 3~5mm,垂直分量为 10~15mm,于 2001 年完成。

上述三网经联合平差后取名为 GPS2000 网,其成果是经过严格数据处理的,精度很高,作为我国现代大地坐标框架,可见 GPS 将在国民经济建设中发挥越来越重要的作用。另外,很多城市都采用 GPS 技术建立了城市控制网。

7.1.2 GPS 的特点

GPS 系统的特点是高精度、全天候、高效率、多功能、操作简便、应用广泛等。

1. 定位精度高

单机定位精度优于 10m,采用差分定位,精度可达厘米级和毫米级。经应用实践已经证明, GPS 相对定位精度为:在 50km 以内可达 $1 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-6}$,在 100~500km 的基线上可达 $10^{-6} \sim 10^{-7}$,在大于 1 000km 的距离上,相对定位精度达到或优于 10^{-8} 。

2. 观测时间短

随着 GPS 系统的不断完善,软件的不断更新,目前 20km 以内相对静态定位仅需 15~20min;快速静态相对定位测量时,当每个流动站与基准站相距在 15km 以内时,流动站观测时间只需 1~2min,然后可随时定位,每站观测只需几秒钟。

3. 功能多,应用广,全球、全天候工作

7.1.3 GPS 系统组成

GPS 定位系统由空间卫星部分、地面监控部分和用户接收部分构成了一个完整的系统。

1. 空间卫星部分

全球定位系统的空间卫星部分原计划由 21 颗 GPS 工作卫星和 3 颗在轨备用卫星组成, 构成完整的 (21+3) 形式的 GPS 卫星工作星座, 如图 7-1 所示。实际工作时, 21 颗工作卫星均匀地分布在编号为 A、B、C、D、E、F 六个轨道平面内, 如图 7-2 所示, 每个轨道平面上分布 4 颗工作卫星。轨道面相对于赤道平面的倾角为 55° , 各个轨道平面之间的夹角为 60° 。这种卫星分布可保证在地球上任何地方、任何时刻均可观测到至少 4 颗卫星。GPS 卫星平均轨道高度为 20 200km, 运行周期为 11h58min (恒星时)。

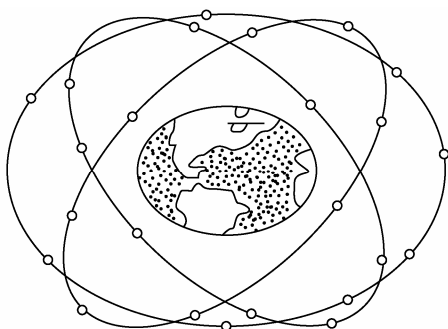


图 7-1 原计划的 24 颗卫星

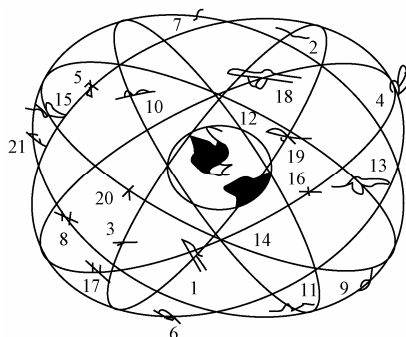


图 7-2 21 颗工作卫星

2. 地面监控部分

地面监控部分包括 1 个主控站、3 个注入站和 5 个监测站, 如图 7-3 所示。主控站位于美国科罗拉多斯平市 (Colorado Springs) 的联合空间执行中心 (CSOC), 3 个注入站分别设在大西洋、印度洋和太平洋的 3 个美国军事基地上, 即大西洋的阿松森岛 (Ascension)、印度洋的狄哥·伽西亚 (Diego Garcia) 和太平洋的卡瓦加兰 (Kwajalein), 5 个监测站设在主控站和 3 个注入站及夏威夷岛。



图 7-3 GPS 卫星地面监控站示意图

监测站的主要任务是对每颗卫星进行观测, 精确测定卫星在空间的位置, 向主控站提供观测数据。每个监测站还配有 GPS 接收机, 对每颗卫星连续不断地进行观测, 每 6s 进行一次伪距测量和积分多普勒观测, 并采集与气象有关的数据。监测站受主控站的控制, 定时将观测数据送往主控站。

主控站拥有大型电子计算机，作为数据采集、计算、传输、诊断、编辑等功能的主体设备。

(1) 数据采集。主控站采集各个监测站所测得的伪距和积分多普勒观测值、气象要素、卫星时钟和工作状态数据，监测站自身的状态数据，以及海军水面兵器中心发来的参考星历。

(2) 编辑导航电文。根据采集到的全部数据，计算出每颗卫星的星历、时钟改正数、状态数据及大气改正数，并按一定格式编辑为导航电文，传送到注入站。

(3) 诊断功能。对整个地面支撑系统的协调工作进行诊断。对卫星的健康状况进行诊断，并加以编码向用户指示。

(4) 调整卫星。根据所测的卫星轨道参数，及时将卫星调整到预定轨道，使其发挥正常作用。而且还可以进行卫星调度，用备份卫星取代失效的工作卫星。

主控站将编辑的卫星电文传送到位于三大洋的 3 个注入站，注入站通过 S 波段微波链路，定时地将有关信息注入各个卫星，然后由 GPS 卫星发送给广大用户，这就是所用的广播星历。GPS 控制系统示意图如图 7-4 所示。

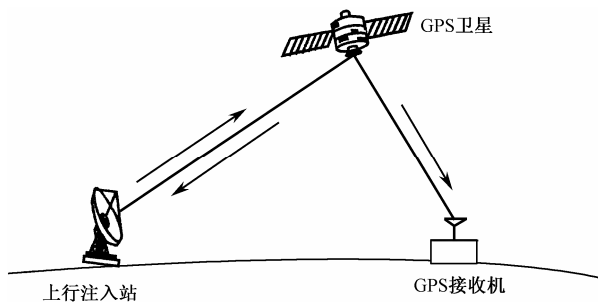


图 7-4 GPS 控制系统示意图

3. 用户接收部分

全球定位系统的空间部分和地面监控部分，是用户应用该系统进行导航和定位的基础，而用户只有通过 GPS 信号接收机，才能实现导航和定位的目的。GPS 接收机通过接收 GPS 卫星发射信号，获得必要的导航和定位信息、观测量，经过数据处理而完成导航和定位工作。以上 3 个部分共同组成一个完整的 GPS 系统。

7.2

GPS 定位坐标系统和时间系统

全球定位系统（GPS）的最基本任务是确定用户在空间的位置。所谓用户的位置，实际上是指该用户在特定坐标系的位置坐标，位置是相对于参考坐标系而言的，为此，首先要设立适当的坐标系。

7.2.1 坐标系统

1. 天球坐标系和地球坐标系

坐标系统是由原点位置 O ，以及 3 个坐标轴的指向和尺度所定义的。根据坐标轴的指向不同，可划分为两大类坐标系，即天球坐标系和地球坐标系。由于坐标系相对于时间的依赖性，每一类坐标系又可划分为若干种不同定义的坐标系。不管采用什么形式，坐标系之间通过坐标

平移、旋转和尺度转换，可将一种坐标系变换到另一种坐标系。

1) 天球坐标系

天球坐标系分天球空间直角坐标系和天球球面坐标系，天球空间直角坐标系与天球球面坐标系的关系如图 7-5 所示。

天球空间直角坐标系以地球质心 O 为坐标原点， Z 轴指向天球北极， X 轴指向春分点（等分日）， Y 轴垂直于 XOZ 平面，与 X 轴和 Z 轴构成右手坐标系。在此坐标系下，空间点的位置由坐标 (X, Y, Z) 来描述。

天球球面坐标系是以地球质心 O 为坐标原点，春分点轴与天轴所在平面为天球经度（赤经）测量基准——基准子午面，赤道为天球纬度测量基准而建立的球面坐标，如图 7-5 所示。空间点的位置在天球球面坐标系下的表述为 (r, α, δ) 。对同一空间点 P ，天球直角坐标系与其等效的天球球面坐标系参数间的转换有式 (7-1) 和式 (7-2) 的关系。

$$\left. \begin{aligned} X &= r \cos \alpha \cos \delta \\ Y &= r \sin \alpha \cos \delta \\ Z &= r \sin \delta \end{aligned} \right\} \quad (7-1)$$

$$\left. \begin{aligned} r &= \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \\ \alpha &= \arctan(Y/X) \\ \delta &= \arctan(Z/\sqrt{X^2 + Y^2}) \end{aligned} \right\} \quad (7-2)$$

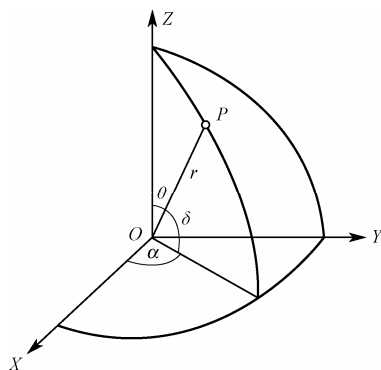


图 7-5 天球空间直角坐标系与天球球面坐标系的关系

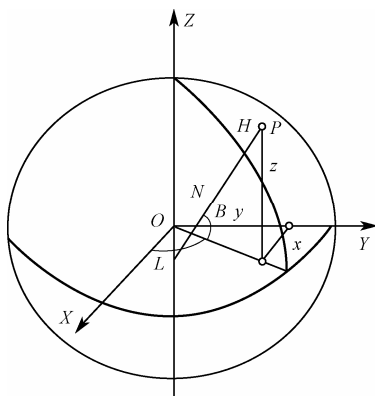


图 7-6 地球直角坐标系与地球大地坐标系的关系

2) 地球坐标系

地球坐标系分地球直角坐标系和地球大地坐标系，两坐标系之间的关系如图 7-6 所示。地球直角坐标系的原点 O 与地球质心重合， Z 轴指向地球北极， X 轴方向指向地球赤道面与瑞士的格林尼治子午圈的交点， Y 轴在赤道平面里，与 XOZ 构成右手坐标系。

地球大地坐标系以地球椭球的中心与地球质心重合，椭球的短轴与地球自转轴重合。空间点位置在该坐标系中表述为 (L, B, H) 。对同一空间点 P ，地球直角坐标系与地球大地坐标系参数间的转换关系如式 (7-3) 和式 (7-4) 所示。

$$\left. \begin{aligned} X &= (N + H) \cos B \cos L \\ Y &= (N + H) \cos B \sin L \\ Z &= [(N(1 - e^2) + H) \sin B] \end{aligned} \right\} \quad (7-3)$$

$$\left. \begin{aligned} L &= \arctan(Y + X) \\ B &= \arctan \left\{ Z(N + H) / \left[\sqrt{X^2 + Y^2} (N(1 - e^2) + H) \right] \right\} \\ H &= Z / \sin B - N(1 - e^2) \end{aligned} \right\} \quad (7-4)$$

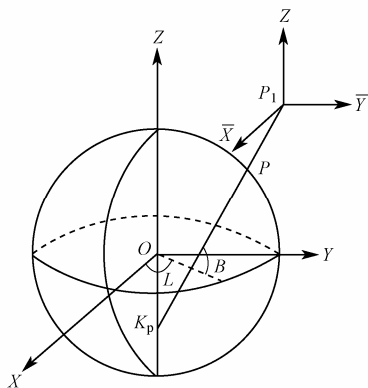


图 7-7 站心赤道直角坐标系

式中, $N = a / \sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}$ 为该点的卯酉曲率半径; $e^2 = (a^2 - b^2) / a^2$, a 、 e 分别为该大地坐标系对应椭球的长轴半径和第一偏心率。

3) 站心坐标系

站心坐标系分站心赤道直角坐标系与站心地平直角坐标系, 站心赤道直角坐标系如图 7-7 所示。

站心赤道直角坐标系中, P_1 是测站点, O 为球心。以 O 为原点建立球心空间直角坐标系 $P_1 - \bar{X}\bar{Y}\bar{Z}$, 以 P_1 为原点建立与 $O - XYZ$ 相应坐标轴平行的坐标系。 $O - XYZ$ 叫做站心赤道直角坐标系。显然, $P_1 - \bar{X}\bar{Y}\bar{Z}$ 同 $O - XYZ$ 坐标系有简单的平移关系, 如式 (7-5) 所示。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{X} \\ \bar{Y} \\ \bar{Z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (N + H) \cos B \cos L \\ (N + H) \cos B \sin L \\ [N(1 - e^2) + H] \sin B \end{bmatrix} \quad (7-5)$$

站心地平直角坐标系是以 P_1 为原点, 以 P_1 点的法线为 z 轴 (指向天顶为正), 以子午线方向为 x 轴 (向北为正), y 轴与 x 、 z 垂直 (向东为正) 建立的坐标系。站心地平直角坐标系与站心赤道直角坐标系的转换关系如式 (7-6) 所示。

$$\begin{bmatrix} \bar{X} \\ \bar{Y} \\ \bar{Z} \end{bmatrix}_{\text{站赤}} = R_z(180 - L) R_y(90 - B) P_y \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{\text{地平}} = \begin{bmatrix} -\sin B \cos L & -\sin L & \cos B \cos L \\ -\sin B \sin L & \cos L & \cos B \sin L \\ \cos B & 0 & \sin B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{\text{地平}} \quad (7-6)$$

代入式 (7-4) 可得出站心左手地平直角坐标系与球心空间直角坐标系的转换关系如式 (7-7) 所示。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{球空}} = \begin{bmatrix} -\sin B \cos L & -\sin L & \cos B \cos L \\ -\sin B \sin L & \cos L & \cos B \sin L \\ \cos B & 0 & \sin B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{\text{地平}} + \begin{bmatrix} (N + H) \cos B \cos L \\ (N + H) \cos B \sin L \\ [N(1 - e^2) + H] \sin B \end{bmatrix} \quad (7-7)$$

2. 卫星测量中常用坐标系

1) 瞬时极天球坐标系

原点位于地球质心, z 轴指向瞬时地球自转方向 (真天极), x 轴指向瞬时春分点 (真春分点), y 轴按构成右手坐标系取向。

2) 瞬时极地球坐标系

原点位于地球质心, z 轴指向瞬时地球自转轴方向, x 轴指向瞬时赤道面和包含瞬时地球自转轴与平均天文台赤道参考点的子午面的交点, y 轴按构成右手坐标系取向。瞬时极天球坐标系

与瞬时极地球坐标系的关系如图 7-8 所示。
 瞬时极天球坐标系和瞬时极地球坐标系之间的转换关系见式 (7-8)。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{\text{et}} = R_z(\theta_G) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{\text{ct}} \quad (7-8)$$

式中, 下标 et 表示对应 t 时刻的瞬时极地球坐标系; ct 表示对应 t 时刻的瞬时极天球坐标系; θ_G 表示对应格林尼治子午面的真春分点的角度。

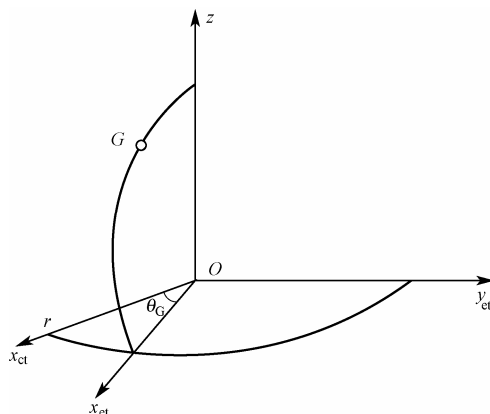


图 7-8 瞬时极天球坐标系与瞬时极地球坐标系的关系

3) 固定极天球坐标系 (平天球坐标系)

选择某一历元时刻, 以此瞬间的地球自转轴和春分点方向, 分别扣除此瞬间的章动值作为 z 轴和 x 轴指向, y 轴按构成右手坐标系取向, 建立天球坐标系 (平天球坐标系), 坐标系原点与真天球坐标系原点相同。瞬时极天球坐标系与历元平天球坐标系之间的坐标变换通过下面两次变换来实现。

(1) 岁差旋转变换。ZM(t_0)表示历元 J2000.0 年平天球坐标系 z 轴指向, ZM(t)表示所论历元时刻 t 真天球坐标系 z 轴指向。两个坐标系间的变换式为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{M(t)} = R_z(-Z_A) R_y(\theta_A) R_z(-\xi_A) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{M(t_0)} \quad (7-9)$$

式中, ξ_A 、 θ_A 、 Z_A 为岁差参数。

(2) 章动旋转变换。类似地有章动旋转变换式, 如式 (7-10) 所示。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{c(t)} = R_x(-\varepsilon - \Delta\varepsilon) R_z(-\Delta\psi) R_x(\varepsilon) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{M(t)} \quad (7-10)$$

式中, ε 为所论历元的平黄赤交角; $\Delta\psi$ 、 $\Delta\varepsilon$ 分别为黄经章动和交角章动参数。

4) 固定极地球坐标系 (平地球坐标系)

地球瞬时自转轴在地球上随时间而变的现象, 称为地极移动, 简称为极移。与观测瞬间相对应的自转轴所处的位置, 称为该瞬时的地球极轴, 相应的极点称为瞬时极。采用国际上 5 个纬度服务站国际协定原点 CIO 的资料, 以 1900—1905 年地球自转轴瞬时位置的平均位置作为地球的固定极, 称为国际协定原点 CIO。瞬时极与平极的关系如图 7-9 所示。

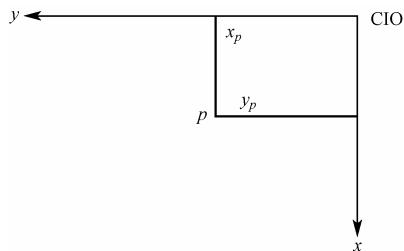


图 7-9 瞬时极与平极的关系

取平地极为坐标原点, z 轴指向 CIO, x 轴指向协定赤道面与格林尼治子午线的交点, y 轴在协定赤道面里与 xoz 构成右手系统而成的坐标系统称为平地球坐标系。平地球坐标系与瞬时地球坐标系的转换公式如式 (7-11) 所示。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{\text{em}} = R_y(-x_p'') R_x(y_p'') \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{\text{et}} \quad (7-11)$$

式中, 下标 em 表示平地球坐标系; et 表示 t 时刻的瞬时地球坐标系; x_p'' , y_p'' 为 t 时刻以角度表示的极移值。

3. WGS-84 坐标系和我国大地坐标系

1) WGS-84 坐标系

WGS-84 是修正 NSW92-2 参考系的原点和尺度变化, 并旋转其参考子午面与 BIH 定义的零度子午面一致而得到的一个新参考系。WGS-84 坐标系的原点在地球质心, Z 轴指向 BIH1984.0 定义的协定地球极 (CTP) 方向, X 轴指向 BIH1984.0 的零度子午面和 CTP 赤道的交点, Y 轴、 Z 轴和 X 轴构成右手坐标系。它是一个地球固定坐标系。WGS-84 采用的椭球是国际大地测量与地球物理学联合会第 17 届大会的推荐值, 其 4 个基本参数为: 长半径 $a=6378137 \pm 2$ (m), 地球 (含大气层) 引力常数 $GM=3986005 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \pm 0.6 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$, 正常化二阶带谐系数 $C2.0=-484.16685 \times 10^{-6} \pm 0.6 \times 10^{-6}$, 地球自转角速度 $\omega=7292115 \times 10^{-11} \text{ rads}^{-1} \pm 0.1500 \times 10^{-11} \text{ rads}^{-1}$ 。

2) 国家大地坐标系

国家大地坐标系主要有 BJ54 旧坐标系、GDZ80 坐标系和 BJ54 新坐标系。

(1) 1954 年北京坐标系 (BJ54 旧)。该坐标原点为前苏联的普尔科沃, 参考椭球为克拉索夫斯基椭球, 平差方法为分区分期局部平差。

该坐标系存在的问题是椭球参数有较大误差, 参考椭球面与我国大地水准面存在着自西向东明显的系统性倾斜, 几何大地测量和物理大地测量应用的参考面不统一, 定向不明确。

(2) 1980 年国家大地坐标系 (GDZ80)。该坐标原点为陕西省泾阳县永乐镇, 参考椭球为 1975 年国际椭球, 平差方法为天文大地网整体平差。

该坐标系的特点是采用 1975 年国际椭球, 是在 1954 年北京坐标系基础上建立起来的, 它采用多点定位, 定向明确。大地原点地处我国中部, 大地高程基准采用 1956 年黄海高程。

(3) 新 1954 年北京坐标系 (BJ54 新)。新 1954 年北京坐标系 (BJ54 新) 是由 1980 年国家大地坐标 (GDZ80) 转换得来的。坐标原点在陕西省泾阳县永乐镇, 参考椭球为克拉索夫斯基椭球, 平差方法为天文大地网整体平差。

BJ54 新的特点是采用克拉索夫斯基椭球, 是综合 GDZ80 和 BJ54 旧而建立起来的参心坐标系, 采用多点定位, 定向明确。但椭球面与大地水准面在我国境内不是最佳拟合, 大地原点与 GDZ80 相同, 但大地起算数据不同, 大地高程基准采用 1956 年黄海高程, 与 BJ54 旧相比, 所采用的椭球参数相同, 其定位相近, 但定向不同, BJ54 旧与 BJ54 新无全国统一的转换参数, 只能进行局部转换。

7.2.2 时间系统

在空间科学技术中, 时间系统是精确描述卫星与天体的运行位置及其相互关系的重要基准, 它是利用卫星定位的基准之一。时间包含“时刻”和“时间间隔”。

1. 恒星时 ST

以春分点为参考点, 把春分点的周日视运动所确定的时间称为恒星时, 恒星时 ST 可分为真恒星时和平恒星时。其计量时间单位有恒星日、恒星小时、恒星分、恒星秒, 换算关系

见式 (7-12)。

$$1 \text{ 个恒星日} = 24 \text{ 个恒星小时} = 1440 \text{ 个恒星分} = 86400 \text{ 个恒星秒} \quad (7-12)$$

2. 平太阳时 MT

假设一参考点视运动速度等于真太阳周年运动的平均速度, 且其在天球赤道上做周年视运动, 该参考点称为平太阳。平太阳连续两次经过本地子午圈的时间间隔为一个平太阳日, 一个平太阳日包含 24 个平太阳时。平太阳计量时间单位有平太阳日、平太阳小时、平太阳分、平太阳秒, 换算关系见式 (7-13)。

$$1 \text{ 个平太阳日} = 24 \text{ 个平太阳小时} = 1440 \text{ 个平太阳分} = 86400 \text{ 个平太阳秒} \quad (7-13)$$

平太阳时与日常生活中使用的时间系统是一致的, 通常钟表所指示的时刻正是平太阳时。

3. 世界时 UT

把以平子午夜为零时起算的格林尼治平太阳时定义为世界时 UT。

4. 原子时 IAT

原子时是以物质内部原子运动的特征为基础建立的时间系统。原子时的尺度标准是国际制秒 (SI), 其原点由式 (7-14) 确定。

$$AT = UT - 0.039(s) \quad (7-14)$$

通过对国际上 100 多座原子钟相互对比并进行数据处理, 推出统一的原子时系统, 称为国际原子时 (International Atomic Time, IAT)。

5. 协调世界时 UTC

为了兼顾世界时和原子时, 需要建立一种折中的时间系统, 称为协调世界时 UTC。根据国际规定, 协调世界时 UTC 的秒长与原子时秒长一致, 在时刻上则要求尽量与世界时接近。协调世界时与原子时之间的关系见式 (7-15)。

$$IAT = UTC + 1s \times n \quad (7-15)$$

式中, n 为调整参数。

6. GPS 时间系统 GPST

GPST 属于原子时系统, 它的秒长即为原子时秒长, GPST 的原点与国际原子时 IAT 相差 19s。GPS 时间系统与原子时有如下的关系式。

$$IAT - GPST = 19(s) \quad (7-16)$$

GPS 时间系统与各种时间系统的关系如图 7-10 所示。

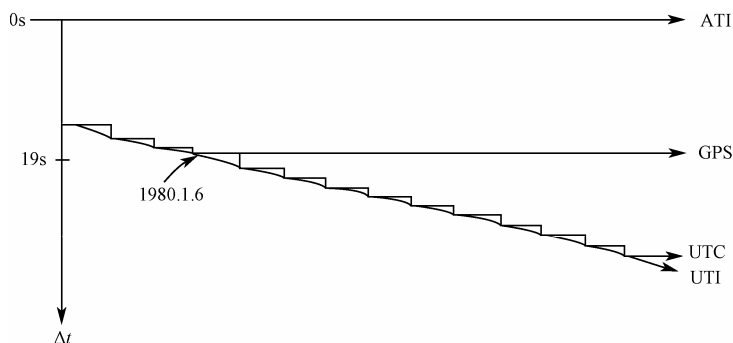


图 7-10 GPS 时间系统与各种时间系统的关系

GPS 定位的基本原理是把高速运动的卫星瞬间位置作为已知的起算数据,采用空间距离后方交会的方法,确定待测点的位置。

7.3.1 基本原理

测量学中的交会法测量里有一种测距交会确定点位的方法。与其相似,GPS 的定位原理就是

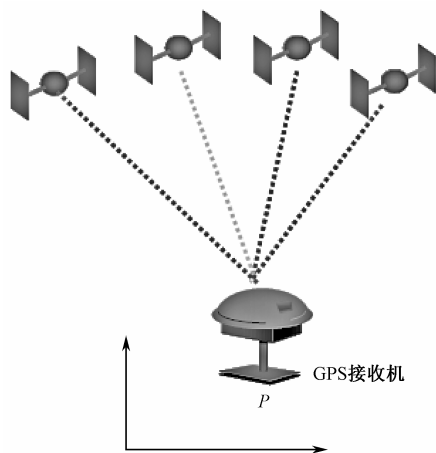


图 7-11 GPS 定位原理

是利用空间分布的卫星以及卫星与地面点的距离交会,得出地面点位置。简言之,GPS 定位原理是一种空间的距离交会原理。

设想在地面待定位位置上安置 GPS 接收机,同一时刻接收 4 颗以上 GPS 卫星发射的信号。通过一定的方法测定这 4 颗以上卫星在此瞬间的位置,以及它们分别至该接收机的距离,利用距离交会法解算出测站 P 的位置及接收机钟差 δt ,如图 7-11 所示。设时刻 t_i 在测站点 P 用 GPS 接收机同时测得 P 点至 4 颗 GPS 卫星 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 的距离 ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 、 ρ_4 ,通过 GPS 电文解译出 4 颗 GPS 卫星的三维坐标 (X^j, Y^j, Z^j) , $j=1,2,3,4$,用距离交会的方法求解 P 点的三维坐标 (X, Y, Z) 的观测方程为式 (7-17)。

$$\begin{cases} \rho_1^2 = (X - X^1)^2 + (Y - Y^1)^2 + (Z - Z^1)^2 + c\delta t \\ \rho_2^2 = (X - X^2)^2 + (Y - Y^2)^2 + (Z - Z^2)^2 + c\delta t \\ \rho_3^2 = (X - X^3)^2 + (Y - Y^3)^2 + (Z - Z^3)^2 + c\delta t \\ \rho_4^2 = (X - X^4)^2 + (Y - Y^4)^2 + (Z - Z^4)^2 + c\delta t \end{cases} \quad (7-17)$$

式中, c 为 GPS 信号的传播速度(光速), δt 为接收机钟差。

式 (7-17) 中 4 个方程式中各个参数意义: X 、 Y 、 Z 为待测点坐标的空间直角坐标; X^i 、 Y^i 、 Z^i ($i=1,2,3,4$) 分别为卫星 1、卫星 2、卫星 3 和卫星 4 在 t 时刻的空间直角坐标,可由卫星导航电文求得; δt 为接收机的钟差。由以上 4 个方程即可解算出待测点的坐标 X 、 Y 、 Z 和接收机的钟差 δt 。

7.3.2 GPS 定位方法

GPS 定位有多种方法,用户可以根据不同的用途采用不同的定位方法。GPS 定位方法可依据不同的分类标准,根据定位时接收机的运动状态分为动态定位和静态定位。

1. 动态定位

所谓动态定位,就是在进行 GPS 定位时,认为接收机的天线在整个观测过程中的位置是变化的。也就是说,在数据处理时,将接收机天线的位置作为一个随时间改变而改变的量。动态定位又分为 Kinematic 和 Dynamic 两类。

2. 静态定位

所谓静态定位，就是在进行 GPS 定位时，认为接收机的天线在整个观测过程中的位置是保持不变的。也就是说，在数据处理时，将接收机天线的位置作为一个不随时间改变而改变的量。在测量中，静态定位一般用于高精度的测量定位，其具体观测模式是多台接收机在不同的测站上进行静止同步观测，时间几分钟、几小时甚至数十小时不等。

7.4 GPS 测量技术与外业施测

GPS 的测量可分为技术设计、外业施测和内业数据处理 3 个主要阶段。

7.4.1 GPS 测量技术设计依据

GPS 测量技术设计主要依据 GPS 测量规范及测量任务书。

1. GPS 测量规范

GPS 测量规范是国家质量技术监督局或行业部门所制定的技术标准，目前 GPS 控制网设计依据规程有 2001 年由国家质量技术监督局发布的《全球定位系统（GPS）测量规范》、1992 年由国家测绘局发布的测绘行业标准《全球定位系统（GPS）测量规范》和 1998 年由国家建设部发布的行业标准《全球定位系统城市测量技术规程》，以及各地区的测量规程和细则。

2. 测量任务书

测量任务书（或测量合同）是测量单位的上级主管单位下达的指令性技术要求文件，包括测量目的、范围、精度、密度等。

3. 测量精度

在国标中，根据用途将 GPS 测量分为 AA、A、B、C、D、E 共 6 个精度等级，各级别具体要求如表 7-1 所示。

表 7-1 精度分级

级 别	固定误差 a/mm	比例误差系数	级 别	固定误差 a/mm	比例误差系数
AA	≤ 3	≤ 0.01	C	≤ 10	≤ 5
A	≤ 5	≤ 0.1	D	≤ 10	≤ 10
B	≤ 6	≤ 1	E	≤ 10	≤ 20

4. 基线长度及网点布设

GPS 控制测量中各等级 GPS 相邻点间弦长的精度用式（7-18）表示。

$$\delta = \sqrt{a^2 + (b \cdot d \cdot 10^{-6})^2} \tag{7-18}$$

式中， δ 为 GPS 基线向量等效距离误差（mm）； a 为 GPS 接收机标称精度中的固定误差（mm）； b 为 GPS 接收机标称精度中的比例误差； d 为 GPS 网中相邻点间的距离（mm）。

根据国标，GPS 测量点位的密度由不同等级而定，相邻点间平均距离应符合表 7-2 的要求，而且相邻点间最小距离可为平均距离的 1/3~1/2 倍，最大距离可为平均距离的 2~3 倍。

表 7-2 GPS 网中相邻点间平均距离

级 别	AA	A	B	C	D	E
平均距离	1 000	300	70	10~15	5~10	0.2~5

7.4.2 GPS 控制网的设计及优化

1. GPS 控制网的基准设计

GPS 控制网的基准设计包括位置基准、方位基准和尺度基准。方位基准一般由给定的起算方位角值确定；尺度基准由地面的电磁波测距确定；位置基准由以下几方面因素决定。

(1) 为求得 GPS 点在国家或地方坐标系中的坐标，应联测地面控制点，用于坐标变换。当测区有旧的地面控制点成果时，应既考虑充分利用旧资料，又要使新建的高精度 GPS 控制网不受旧资料精度较低的影响。为此，应将新的 GPS 网与旧控制点进行联测，联测点一般应不少于 3 个。

(2) GPS 网的坐标系统尽量应与测区过去采用的坐标系统一致，应了解所采用的参考椭球体（通常以国家坐标系的参考椭球为基础），坐标系的中央子午线的经度值，纵、横坐标的加常数，坐标系的投影面高程及测区平均高程异常值，起算点的坐标等几个参数。实际工作中，有时难以找到说明以上参数的资料，此时，也可以通过分析计算的方法处理。

(3) GPS 网平差后得到的是大地高，为了得到 GPS 点的常高，应使一定数量的 GPS 点与水准点重合，或者对部分 GPS 点联测水准。联测的高程点需均匀地分布于网中，对丘陵或山区高程点应按照高程拟合曲面的要求进行布设。

2. GPS 控制网图形设计的几个基本概念

(1) 观测时段。测站上开始接收卫星信号到观测停止所连续工作的时间段简称为时段。

(2) 同步观测。两台或两台以上接收机同时对同一组卫星进行的观测。

(3) 同步观测环。3 台或 3 台以上接收机同步观测获得的基线向量所构成的闭合环，简称为同步环。

(4) 独立基线。对于 N 台 GPS 接收机构成的同步观测环，有 J 条同步观测基线，其中独立基线数为 $N-1$ ，独立基线之间没有相关性。

(5) 独立观测环。由独立观测所获得的基线向量构成的闭合环，简称为独立环。

(6) 异步观测环。如果在构成多边形环路的所有基线向量中只有非同步观测基线向量，则该多边形环路叫做异步观测环，简称为异步环。

(7) 非独立基线。除独立基线外的其他基线叫做非独立基线，总基线数与独立基线数之差为非独立基线数。

3. GPS 网特征条件的计算

对于由 N 台 GPS 接收机构成的同步图形，一个时段包含的基线（或简称 GPS 边）数为： $J=N(N-1)/2$ 。其中，仅有 $N-1$ 条是独立边，其余为非独立边。

当同步观测的 GPS 接收机数 $N>3$ 时，同步闭合环的最少个数 T 应为

$$T = J - (N - 1) = (N - 1)(N - 2) / 2 \quad (7-19)$$

4. 观测时段数计算公式

$$C = n \times m / N \quad (7-20)$$

式中， C 为观测时段数； n 为网点数； m 为每点平均设站次数； N 为接收机数。因此，在 GPS 网中总基线数 $J_{\text{总}} = C \times N \times (N-1) / 2$ ；必要基线数 $J_{\text{必}} = n - 1$ ；独立基线数 $J_{\text{独}} = C \times (N-1)$ ；多余基线数

$J_{\text{多}} = C \times (N-1) - (n-1)$ 。依据以上公式, 就可以确定出一个具体 GPS 网图形结构的主要特征。

5. 对于同步环和异步环的几点说明

(1) 在理论上, 同步闭合环中各 GPS 的坐标差之和即闭合差应为零, 但实际上并非如此, 一般规范都规定了同步闭合差的限差。但是当由于某种原因, 同步不是很好时, 应适当放宽此项限差。

(2) 同步闭合环的闭合差较小, 只能说明基线向量的计算合格, 并不能说明 GPS 边的观测精度高, 也不能发现接收的信号受到干扰而产生的某些粗差。为了确保 GPS 观测效果的可靠性并有效地发现观测成果中的粗差, 必须使 GPS 网中的独立边构成一定的几何图形。这种几何图形可以由数条独立边构成的非同步多边形 (也称为非同步闭合环)。当 GPS 网中有若干个起算点时, 也可以是由两个起算点之间的数条 GPS 独立边构成的复合路线。GPS 网的图形设计, 就是根据所布设的网的精度要求和其他方面的要求, 设计出由独立边构成的多边形网。

(3) 对于异步环的构成, 一般应按所设计的网图选定, 必要时在经技术负责人审定后, 也可根据具体情况适当调整。当接收机多于 3 台时, 也可按软件功能自动挑选独立基线构成环路。

6. GPS 控制网的技术设计

GPS 控制网布设的问题就是怎样将各同步环有机地连成一个整体, 构成一定数量的同步观测环和异步观测环, 也可采用线路形式, 以较好地满足精度、可靠性、经费和后勤等限制条件。根据以上布网原则, GPS 网的布设通常有 4 种方式: 星形网、点连式、边连式和混合式。

1) 星形网

星形网的结构如图 7-12 (a) 所示, 其特点是几何图形简单, 只需两台 GPS 接收机, 是一种快速定位作业方式。但是, 由于基线间不构成任何同步闭合图形, 因此抗粗差能力差, 一般适用于精度较低的工程测量。

2) 点连式

点连式的结构如图 7-12 (b) 所示, 其相邻同步图形之间只有一个公共点连接。这种布网方式几何强度较弱, 抗粗差能力较差, 一般可以加测几个时段以增加网的异步图形闭合条件的个数。

3) 边连式

同步图形之间由一条公共基线连接。这种布网方式几何强度较高, 抗粗差能力较强, 有较多的复测边和非同步图形闭合条件, 在相同的仪器个数的条件下, 观测时段将比点连接方式大大增加, 如图 7-12 (c) 所示。

4) 混连式

该方式把点连式和边连式有机地结合在一起, 既可以提高网的几何强度和可靠性指标, 又减少了外业工作量, 是一种较为理想的布网方法, 如图 7-12 (d) 所示。

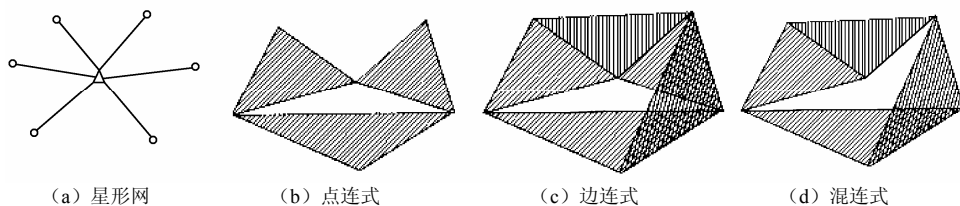


图 7-12 GPS 网的布设常用方式

几种连接方式的特征比较如表 7-3 所示。

表 7-3 3 种连接方式的特征比较

项 目	点 连 式	边 连 式	混 连 式
总点数	6	6	6
同步图形个数	3	5	4
总基线向量数	9	15	12
独立基线向量数	6	10	8
必要基线向量数	5	5	5
多余基线向量数	1	5	3
重复基线向量数	0	4	3
非同步图形个数	1	1	1
一次设站数	3	0	0
二次设站数	3	3	6
三次设站数	0	3	0
总体可靠性指标	0.17	0.50	0.38

注：总体可靠性指标=多余基线数/独立基线数。

GPS 网的技术设计应着眼于控制网的精度、可靠性及经费等要求，也应遵循以下原则：在 GPS 网中不应存在自由基线；GPS 网的闭合环的基线个数不应过多；GPS 网至少应与地面网有 3~5 个分布均匀的重合点，同时也应有相当数量的地面水准点与 GPS 网重合；GPS 点应选在交通便利、视野开阔的地方，同时应考虑点与点之间的通视问题，以便使用经典方法扩展。

7.4.3 GPS 测前准备及技术设计书的编写

在 GPS 外业观测工作进行之前，应进行测区踏测、收集资料、准备器材、拟定观测计划、检验 GPS 接收机及编写设计书等工作。

1. 测区踏测及收集资料

测区踏测的内容包括交通情况、水系分布情况、植被情况、控制点分布情况、居民点分布情况和当地风俗民情等。

应收集资料包括各类图件，各类控制点成果，测区有关的地质、地震、气象、通信等方面的资料，城市及乡、村行政区划图、地籍图等。

2. 器材准备及人员组织

根据观测等级，进行仪器的筹备、计算机及配套设备的配置；结合测区交通情况，筹备运输工具及通信设备；结合测区材料借用情况，筹备施工器材、油料及其他消耗品等；根据测区具体情况并结合测量技术力量组建施工队伍，拟定施工人员名单及岗位；结合测区情况和测量任务，进行详细的投资预算。

3. 外业观测计划拟定

外业观测计划的拟定包括观测计划拟定的依据、观测计划的主要内容、地面网联测方案。

4. 技术设计书编写

技术设计书编写的内容包括任务来源及工作量、测区概况、布网方案、选点与埋标、观测、

数据处理、完成任务的措施等。

7.4.4 GPS 测量外业实施

GPS 测量的外业实施主要包括 GPS 点位选埋、观测、数据传输及数据预处理等。

1. GPS 控制点的选择

GPS 控制点的选择包括选点与标志埋设。

(1) 选点。测量点位的选择应为易于安置接收设备、视野开阔的位置；点位应远离大功率无线电发射源，其距离不小于 200m，远离高压输电线，其距离不小于 50m，以避免电磁场对 GPS 信号的干扰；点位附近不应有大面积水域或强烈干扰卫星信号接收的物体，以减弱多路效应的影响；点位应选交通方便，有利于其他观测手段扩展与联测的地方；点位应选在地面基础稳定，易于点保存的地点，且尽可能使测站附近的小环境同周围大环境保持一致，以减小气象元素的代表性误差；选点人员应按技术设计进行踏勘，在实地按要求选点定位；网型应有利于同步观测及边、点连接；当所选点位需要进行水准联测时，选点人员应实地踏测水准路线，提出有关建议；当利用旧点时，应对旧点的稳定性、完好性，以及觇标是否安全可用进行检查，符合要求方可利用。

(2) 标志的埋设。包括测点的记录、GPS 网的选点网图、土地占用批准文件与测量标志委托保管书、选点与埋石工作技术总结等。

2. 外业观测

外业观测的过程包括观测时依据技术指标，天线安置，开机观测，观测记录。

3. 数据预处理

数据预处理包括数据处理软件的选择和基线解算（数据预处理）等。

4. 观测成果外业检测

观测成果外业检测包括独立闭合环检核、重复观测边的检核、同步观测环检核和异步观测环检核。

5. 野外返工

在对超限的基线进行充分分析的基础上进行野外返工，基线返工应注意如下几个问题。

(1) 无论何种原因造成一个控制点不能与两条合格独立基线相连接，都应在该点上补测或重测不少于一条独立基线。

(2) 虽然可以舍弃在复测基线边长较差、同步环闭合差及独立环闭合差检中超限的基线，但必须保证舍弃基线后的独立环所含基线数不得超过如表 7-3 所示的规定，否则应重测该基线或有关的同步图形。

(3) 当点位不符合 GPS 测量要求而造成一个测站重复观测仍不能满足限差的要求时，应按技术设计要求重新选择点位进行观测。

6. GPS 网平差处理

在各项质量检核符合要求后，经所有独立基线组成闭合图形，以三维基线向量及相应方差协方差阵作为观测信息，并以一个点的 WGS-84 系三维坐标作为其算点，进行 GPS 网的无约束平差。无约束平差结果应提供各控制点在 WGS-84 坐标系下的三维坐标、各基线向量 3 个坐标差观测值的总改正数、极限边长及点位和边长的精度信息等。

在无约束平差确定的有效观测量的基础上，在国家坐标系或城市独立坐标系下进行三维约束平差或二维平差。约束平差中的已知点坐标、已知距离或已知方位，可作为强制约束的

固定值，也可作为加权观测值。平差结果应输出到国家或城市独立坐标系中的三维或二维坐标。

7.4.5 技术总结与上交材料

1. 技术总结

技术总结包括外业技术总结和内业技术总结。

(1) 外业技术总结内容包括：测区及其位置自然地理条件与气候特点、交通、通信及供电等情况；任务来源，项目名称，测区已有测量成果情况，本次施测的目的及基本精度要求；施工单位，施测起讫时间，技术依据作业人员的数量及技术状况；作业仪器类型、精度、检验及使用状况；点位观测质量的评价，埋石与重合点；联测方法、完成各级点数量、补测与重测情况，以及对作业中存在问题的说明；外业观测数据质量分析与野外数据检核情况。

(2) 内业技术总结内容包括：数据处理方案、所采用的软件、所采用的星历、起算数据坐标系系统，以及无约束、约束平差情况；误差检验及相关参数与平差结果的精度估计等；上交成果中尚存在的问题和需要说明的其他问题、建议或改进意见；综合附表与附图。

2. 上交资料

上交资料包括：测量任务书及技术设计书；测点的记录、环视图、测量标志委托保管书、选点资料和标石资料；接收设备、气象及其他仪器的检验资料；外业观测记录、测量记录手簿及其他记录；数据处理中生成的文件、资料和成果，以及 GPS 网展点图；技术总结及成果验收报告。

7.5

GPS 定位测量技术应用

目前 GPS 在大地测量、航空遥感、灾害预测预报、工程测量、气象、交通、海洋和农业等领域得到了广泛应用。

7.5.1 大地测量

GPS 技术在大地测量的应用大体上包括以下几个方面。

1. 基准的建立

建立和维持高精度的三维地心参考基准，建立全球或国家的高精度 GPS 网，加密或扩展地区性的 GPS 控制网，检核、分析与改进原有的地面控制网，确定高程与进行精化大地水准面研究。

2. 开展国际联测

在大地测量应用中，利用 GPS 技术开展国际联测，建立全球性大地控制网，提供高精度的地心坐标，测定和精化大地水准面。1990 年 3、4 月间，我国完成了南海群岛 5 个岛礁 8 个点位和陆地上 4 个大地测量控制点之间的 GPS 联测，初步建立了陆地南海大地测量基准，使海岛与全国大地网联成一个整体。1992 年我国组织 10 多个单位，利用 30 多台 GPS 双频接收机，进行了多个部门参加的全国 GPS 定位大会战。经过数据处理，GPS 网点地心坐标优于 0.2m，点间位置精度优于 10^{-8} 。在我国建立了平均边长约 100km 的 GPS A 级网，提供亚米级精度地心坐标基准。在 A 级网的基础上，我国又布设了边长为 30~100km，全国约 2 500 个点的 B 级

网。A、B 级 GPS 网点都联测了几何水准。A、B 两级 GPS 控制网为我国各部门的测绘工作及建立各级测量控制网，提供了高精度的平面和高程三维基准。

7.5.2 航空遥感技术

GPS 在遥感遥测领域内主要用于以下几个方面：测定航片和卫片上的地面控制点，用于航摄飞机的实时导航，进行由 GPS 辅助的空中三角测量，直接测定摄影机和传感器的空间位置和姿态，GPS 用于航摄外业控制点联测。

在航空摄影测量方面，我国测绘工作者也经历了应用 GPS 技术进行航测外业控制测量、航摄飞行导航、机载 GPS 航测等航测成图的各个阶段。

7.5.3 灾害预测预报

由于 GPS 具有高精度和具备连续自动监测能力，在地质勘探、地面沉降、工程测量等领域中取得了巨大的成功。

1. 地质检测

包括山体滑坡地质灾害、水坝、大桥、海上钻井平台等工程建筑物的安全监测与预报。GPS 监测网的布设、观测与数据处理等，给自然灾害的监测与预报提供了广泛的应用参考。例如，GPS 在大坝外观连续变形监测中的数据采集、数据传输、GPS 数据处理、分析和管理，桥梁外观连续变形监测，海上钻井平台垂直形变监测等都是具体应用的实例。

2. 地面沉降监测

GPS 在大城市地面沉降监测、矿井地面沉陷监测中也得到了广泛应用，如上海市 GPS 地面沉降监测就是 GPS 用于监测城市地面沉降的实例之一。

3. 控制测量

控制测量是 GPS 定位技术应用的一个重要领域，其主要作用是建立和维持高精度三维地心坐标系，进行不同大地控制网之间的联测和转换，建立新的地面控制网，检核和改善已有的地面网，对已有地面网进行加密，研究与精化大地水准面。

另外，在建立全球或全国性的 GPS 网、区域性 GPS 大地控制网的建设、检核和改善常规地面网、加密已有控制网、拟合区域大地水准面等方面都有重大意义。

4. 工程测量

在工程测量方面，应用 GPS 静态相对定位技术布设精密工程控制网，用于城市和矿区油田地面沉降监测、大坝变形监测、高层建筑变形监测、隧道贯通测量等精密工程。加密测图控制点，应用 GPS 实时动态定位技术（简称 RTK）测绘各种比例的地形图和施工放样。在 2005 年的“珠峰高度”测量中，利用 GPS 技术参与测量，为精确测定珠峰高度提供了科技保障。我国的一些城市正在建立“GPS 台站网”，这将为城市基础测绘和“数字城市”建设提供高精度的定位技术服务。

7.5.4 气象、交通、海洋和农业中的应用

1. 气象分析

利用 GPS 理论和技术来遥感地球大气，进行气象学的理论和方法研究。

2. 交通管理

应用 GPS 技术进行测时、测速，不仅精度高，而且设备简单、经济可靠。因此 GPS 测时

与测定接收机载体的运动速度并进行有效的交通管理,是 GPS 技术的另一重要应用领域。

3. 海洋测绘

GPS 在海上定位、海底(水下)地形测量中也得到了广泛应用。

4. 在农业中的应用

利用 GPS 技术,配合遥感技术和地理信息系统,能够做到监测农作物产量分布、土壤成分和性质分布,做到合理按需施肥、播种和喷洒农药,节约费用,降低成本,达到增加产量提高效益的目的。

7.6

习题

1. 填空题

(1) 1997 年由国家测绘局完成了 A 级、B 级网的布设与平差,全网由 756 点组成,其中 A 级网_____点,基线水平方向相对精度为_____,垂直分量相对精度为_____。

(2) 1997 年由中国地震局、总参测绘局、中国科学院、国家测绘局开始建立的全国 GPS 控制网,由_____个基准站、_____个基本站、_____个区域网点组成。

(3) GPS 定位系统由_____部分、_____部分和_____部分 3 主要部分构成。

(4) 卫星测量中常用坐标系包括:①_____;②_____;
③_____;④_____。

(5) GPS 系统根据定位时接收机的运动状态可分为_____定位和_____定位。

2. 是非判断题(正确画√,错误画×)

(1) GPS 系统的特点是高精度、全天候、高效率、多功能、操作简便、应用广泛等。
()

(2) 全球定位系统(GPS)的最基本任务是确定用户在空间的位置。
()

(3) 目前 GPS 在大地测量、航空遥感、灾害预测预报、工程测量、气象、交通、海洋和农业等领域得到了广泛应用。
()

(4) 布设 A 级网的目的,是在全国范围内确定精确的地心坐标,建立起我国新一代地心参考框架及其与国家坐标系的转换参数,作为高精度卫星大地网的骨架,并奠定地壳运动及地球动力学研究的基础。
()

(5) GPS 系统监测站的主要任务是对每颗卫星进行观测,精确测定卫星在空间的位置,向注入站提供观测数据。
()

(6) 坐标系是由原点位置 O ,以及 3 个坐标轴的指向和尺度所定义的。
()

(7) 不管采用什么形式,坐标系之间通过坐标平移、旋转和尺度转换,都可将一种坐标系变换到另一种坐标系。
()

(8) GPS 定位的基本原理是将高速运动的卫星瞬间位置,作为已知的起算数据,采用空间距离后方交会的方法,确定待测点的位置。
()

3. 选择题(将正确答案的序号填入括号内)

(1) 一个完整的 GPS 系统的 3 个主要组成部分不包括()。

- A. 空间卫星部分 B. 地面监控部分
C. 用户接收部分 D. 图像和声音部分

(2) 不属于 GPS 测量技术施测的过程是 ()。

- A. 技术设计 B. 外业施测
C. 内业数据处理 D. 向上级请示

4. 简答题

- (1) GPS 有哪些特点?
(2) 简述 1980 年国家大地坐标系 (GDZ80) 的特点。
(3) 简述新 BJ54 的特点有哪些。
(4) 对于 GPS 测量系统, 目前有哪些测量规范?
(5) 简单说明 GPS 测量的主要应用。

5. 画图题

画出天球坐标系中天球空间直角坐标系和天球球面坐标系的关系示意图。

6. 计算题

(1) 在天球坐标系中, 天球空间直角坐标系的坐标为 $(X, Y, Z) = (300, 400, 500)$ km, 则天球球面坐标系的坐标值 (r, α, δ) 为多少?

(2) 在天球坐标系中, 天球球面坐标系的坐标值为 $(10\,000\text{km}, 30^\circ, 60^\circ)$, 则天球空间直角坐标系的坐标 (X, Y, Z) 为多少?

调研项目: 我国 GPS 技术的发展与现状



调研目的:

1. 通过调研, 了解我国 GPS 技术的总体发展过程及现状。
2. 了解目前我国 GPS 技术水平及其应用状况。
3. 增强对 GPS 技术的感性认识, 提高读者学习 GPS 技术的积极性, 了解 GPS 技术在测量领域中的地位 and 作用。



调研要求:

1. 在调研的基础上, 要按统一要求格式撰写 5 000 字左右的《关于我国 GPS 技术的总体发展过程及现状》调查研究报告。

2. 调研资料要真实、可靠, 论证要清晰、准确。报告中, 在简述我国 GPS 技术的发展历程的基础上, 重点阐述当前我国 GPS 的应用技术及其影响, 最后简要介绍其发展趋势。

**提示:**

可利用图书馆、互联网等查阅有关资料, 在有条件的情况下, 可到有关科研院所、企业、公司进行调研。

实验 7 GPS 原理及应用

**实验目的:**

1. 了解 GPS 的工作原理。
2. 掌握 GPS 接收模块测试及所需要的仪器仪表的使用方法。

**实验方法:**

1. 课前仔细阅读实验指导书, 掌握 GPS 设备的面板结构, 了解有关测量仪器的使用方法。
2. 根据实验指导书的说明, 结合实验设备, 在老师的指导下, 进行实验数据的测量。
3. 注意实验过程中观察到的现象, 做好记录, 并进行分析。

>>> 第8章

蓝牙技术原理与协议

- 🏠 8.1 蓝牙技术概述
- 🏠 8.2 蓝牙的物理信道与链路
- 🏠 8.3 蓝牙分组与数据通信
- 🏠 8.4 蓝牙信息安全
- 🏠 8.5 蓝牙技术应用与产品开发
- 🏠 8.6 习题

“蓝牙”这个名字的来历颇具传奇色彩，公元 10 世纪的北欧正值动荡年代，各国之间战争频繁，丹麦国王哈拉德二世挺身而出，到处疾呼和平，经过他的不懈努力，战争终于停止，各方领袖坐到了谈判桌前，至此，四分五裂的挪威和丹麦得以统一。关于这位国王的名字有两种说法：一种说法是，他的全名是 Harald Blatand，Blatand 在英语中意为“蓝牙”（Bluetooth）；还有一种说法是，这位英雄的丹麦国王酷爱吃蓝莓，以致牙齿都被染成了蓝色，因此“蓝牙”（Bluetooth）便成为了这位国王的绰号。

8.1

蓝牙技术概述

随着世界范围内电子设备技术的高速发展，瑞典的爱立信公司于 1994 年成立了一个专项科研小组，对移动电话及附件的低能耗、低费用、无线连接的可能性进行研究，其最初目的是建立无线电话与 PC 卡、耳机及桌面设备等产品的连接。但随着该项技术研究的深入，科研人员越来越感到这项技术所独具的个性和巨大的商业潜力，同时也意识到凭借一家企业的实力根本无法继续研究。于是爱立信将其公诸于世，并极力说服其他企业加入到该研究中来。其共同目标是建立一个全球性的近范围无线通信技术，并将此技术命名为“蓝牙”，以此来表达要将这种全新的无线传输技术在全球推广并实现全球通用的雄心。

1998 年 2 月，爱立信、诺基亚、IBM、东芝及 Intel 组成了蓝牙利益集团（SIG）。这个集团是商业领域的最佳组合，成为包含两个最大的移动通信公司、两个最大的手提电脑生产商、一个数字信号处理技术的领导者。之后，蓝牙技术引起了越来越多企业的关注。1999 年 11 月，比尔·盖茨专程到拉斯维加斯一间只有 11 名员工的小公司访问，只因这家公司已研制成功一

种含蓝牙技术的胸卡。随后，微软便宣布加入 SIG。目前，包括索尼、惠普、戴尔在内的 2 000 多家公司都签署了相关协议，共享这一先进技术。这么多的精英公司集中在一项技术的大旗下，在商业史上是史无前例的，一项公开的全球统一的技术规范得到了工业界如此广泛的关注和支持，也是以往所罕见的。这正说明了基于蓝牙技术的产品具有广阔的应用前景和巨大的潜在市场。

8.1.1 蓝牙技术的特点

“蓝牙”作为新科技的代名词，没有人会否认它所代表的无线通信联络的时代潮流。一般来讲，蓝牙技术有如下特点。

1. 简单易用

蓝牙最突出的魅力在于其“简单易用”，通信过程操作顺序简单。首先由配备了蓝牙技术的设备搜索出位于半径 10m 以内的另外一台配备蓝牙的设备，经过双方认证后就可以进行通信。

2. 传输速率低、通信距离短

在通信速率及通信距离方面，与用于无线 LAN 的 IEEE802.11b 的传输速率 11Mbps、距离 50m 相比，蓝牙的传输速率为 1Mbps，但是通信距离只有 10m。

3. 成本相对高

目前蓝牙技术的价格相对较高仍是蓝牙产品的缺点，价格是蓝牙面临的主要问题。由于该项技术的综合成本很高，因而导致一些嵌入蓝牙技术模块设备的成本增高。

4. 通信距离极其有限

蓝牙无线通信有效距离较短，一般为 10m 左右，这也是目前蓝牙技术迫切需要研究和解决的问题。

5. 兼容性和安全性

蓝牙的传输速率并不是最快，而且人们普遍认为蓝牙技术存在兼容性和安全性差的缺点。

8.1.2 蓝牙协议体系结构

蓝牙技术规范 (Specification) 包括协议 (Protocol) 和应用规范 (Profile) 两个部分。协议定义了各功能元素 (如串口仿真协议 (RFCOMM)、逻辑链路控制和适配协议 (L2CAP) 等) 各自的工作方式；而应用规范则阐述了为实现一个特定的应用模型 (Usage Model)，各层协议间的运转协同机制。显然，Protocol 是一种横向体系结构，而 Profile 是一种纵向体系结构。较经典的 Profile 有拨号网络 (Dial-up Networking)、耳机 (Headset)、局域网访问 (LAN Access) 和文件传输 (File Transfer) 等，它们分别对应一种应用模型。蓝牙的协议结构如图 8-1 所示。

1. 协议结构

整个蓝牙协议体系结构可分为底层硬件模块、中间协议层 (软件模块) 和高端应用层 3 大部分。图 8-1 中所示的链路管理层 (LMP)、基带层 (BB) 和射频层 (RF) 属于蓝牙的硬件模块。RF 层通过 2.4GHz 无须授权的 ISM 频段的微波，实现数据位流的过滤和传输，它主要定义了蓝牙收发器在此频带正常工作所满足的要求；BB 层负责跳频、蓝牙数据及信息帧的传输；LMP 层负责链接的建立和拆除，以及链路的安全和控制。它们为上层软件模块提供了不同的访问入口，但是两个模块接口之间的消息和数据传递，必须通过蓝牙主机控制器接口 (HCI) 的解释才能进行。HCI 是蓝牙协议中软硬件之间的接口，它提供了一个调用下层 BB、LMP、

状态和控制寄存器等硬件的统一命令接口。HCI 以上的协议软件实体运行在主机上，而 HCI 以下的功能由蓝牙设备来完成，二者之间通过一个对两端透明的传输层进行交互。

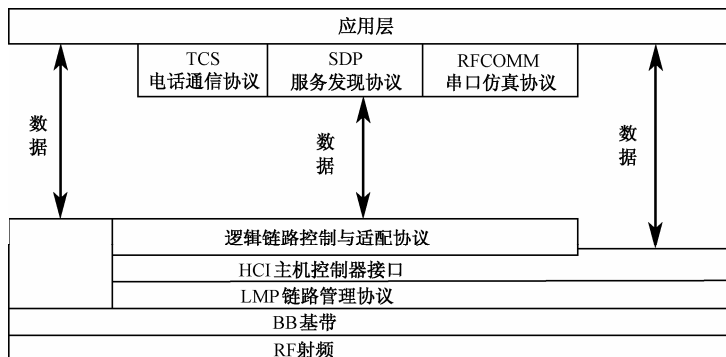


图 8-1 蓝牙的协议结构示意图

中间协议层包括逻辑链路控制与适配协议（Logical Link Control and Adaptation Protocol, L2CAP）、服务发现协议（Service Discovery Protocol, SDP）、串口仿真协议（RFCOMM）和电话通信协议（Telephone Communication Protocol, TCS）。L2CAP 完成数据拆装、服务质量控制和协议复用等功能，是其他上层协议实现的基础，因此也是蓝牙协议栈的核心部分；SDP 为上层应用程序提供一种机制来发现网络中可用的服务及特性；RFCOMM 依据 ETSI 标准 TS07.10，在 L2CAP 上仿真 9 针 RS232 串口的功能；TCS 提供蓝牙设备之间的语音和数据的呼叫控制信令。在蓝牙协议栈的最上部是应用层（Applications），它对应于各种应用模型的 Profile 的一部分。

2. 蓝牙协议

蓝牙利益集团（SIG）于 1999 年 7 月公布协议 1.0 版本，2001 年 2 月又推出 1.1 版协议。

蓝牙规范的协议栈仍采用分层结构，分别完成数据流的过滤和传输，跳频和数据帧传输，链路的建立和释放，链路的控制、数据的拆装、业务质量（QoS）、协议的复用和分段重组等功能。

完整的协议栈如图 8-1 所示，包括蓝牙专用协议（如链路管理协议 LMP 和逻辑链路控制与适配协议 L2CAP）及非专用协议（如对象交换协议 OBEX 和用户数据包协议 UDP）。协议设计和协议栈的主要原则是：尽可能利用现有的各种高层协议，保证现有协议的融合，以及各种应用之间的互相操作。高层应用协议（协议栈的垂直层）都使用公共的数据链路和物理层，充分利用兼容蓝牙技术规范的软硬件系统。蓝牙技术规范的开放性保证了设备制造商可以自由地选用其专用协议或习惯使用的公共协议，在蓝牙技术规范的基础上开发新的应用。蓝牙协议体系中的协议分为 4 类。

1) 蓝牙核心协议

蓝牙核心协议由 SIG 制定的蓝牙专用协议组成。绝大部分蓝牙设备都需要核心协议（加上无线部分），而其他协议则根据应用的需要而定。核心协议主要包括基带协议（BaseBand）、链路管理协议（LMP）、逻辑链路控制与适配协议（L2CAP）及服务发现协议（SDP）。

（1）基带协议（BaseBand）。基带协议的任务是确保微网内各蓝牙设备单元之间存在由射频构成的物理连接。蓝牙的射频系统是一个跳频系统，其任一分组在指定时隙、指定频率上发送。使用查询过程使一个单元能发现哪些是在通信范围内的单元，以及它们的设备地址时钟。

通过呼叫过程,能建立实际连接。基带数据分组有两种物理连接方式,即面向连接(SCO)和无连接(ACL),而且在同一射频上可实现多路数据传输。ACL适用于数据分组,其特点是可靠性好,但有延时;SCO适用于语音以及语音与数据的组合,其特点是实时性好,但可靠性比ACL差一些。所有的语音和数据分组都附有不同级别的前向纠错(FEC)或循环冗余校验(CRC),而且可进行加密。可使用各种用户模式在蓝牙设备间传送语音,面向连接的语音分组只需经过基带传输,而不到达L2CAP。语音模式在蓝牙系统内相对简单,只需开通语音连接就可传送语音。

(2) 链路管理协议(LMP)。链路管理协议用来对链路进行设置和控制,负责建立和解除蓝牙设备单元之间的连接、功率控制及认证和加密,还控制蓝牙设备的工作状态(保持、休眠、呼吸和活动)。

(3) 逻辑链路控制与适配协议(L2CAP)。从某种意义上说,L2CAP和LMP都相当于OSI第二层链路层的协议,可认为它与LMP并行工作。基带数据业务可越过LMP直接通过L2CAP向高层协议传送数据。L2CAP向RFCOMM和SDP等层提供面向连接的和无连接的数据服务,采用了多路、分割和重组技术、群体去技术等。L2CAP允许高层协议以64KB长度收发数据分组。虽然基带协议提供了SCO和ACL两种连接类型,但L2CAP只支持ACL。

(4) 服务发现协议(SDP)。服务发现是所有用户模式的基础,SDP上层可有FTP、LAN接入、无绳电话、同步模式等应用。在蓝牙系统中,客户只有通过服务发现协议,才能获得设备信息、服务信息及服务特征,从而在设备单元之间建立不同的SDP层连接。

2) 电缆替代协议(RFCOMM)

RFCOMM可以仿真串行电缆接口协议(如RS232、V.24等),是基于ETSI-07.10串口仿真协议。通过RFCOMM,蓝牙可在无线环境下实现对高层协议(如PPP、TCP/UDP/IP、WAP)的支持。另外,RFCOMM可支持AT命令集,从而实现移动电话和传真机及调制/解调器之间的无线连接。

3) 电话控制协议(TCS-Binary、AT命令集)

电话控制协议包括二进制电话控制协议和AT命令集电话控制协议。

(1) 二进制电话控制协议(TCS二进制或TCS BIN)。该协议是面向比特的协议,该协议规定了蓝牙设备间建立语音和数据呼叫的控制信令,还规定了处理蓝牙TCS设备的移动管理过程。该过程是基于ITU-T Q.931建立而开发的,被指定为蓝牙电话控制协议二进制规范。

(2) AT命令集电话控制协议。AT命令集用来控制多用户模式下,移动电话和调制/解调器,该AT命令集基于ITU-T V.250建议和GSM 07.07标准,还可用于传真业务。

4) 选用协议

(1) 点对点协议(PPP)。在蓝牙协议栈中,PPP位于RFCOMM上层,完成点对点的连接。

(2) TCP/UDP/IP。该协议由互联网工程任务组(IETF)制定,现已发展成为计算机之间最常应用的组网形式。IP协议处理分组在网络中的活动,TCP为两台主机提供可靠的数据通信,UDP则为应用层提供一种非常简单的服务。它们是Internet的基础,在蓝牙设备中,使用这些协议是为了与互联网相连接的设备进行通信。

(3) 对象交换协议(OBEX)。IrOBEX(简称为OBEX)是由红外数据协会(IrDA)制定的会话层协议,它采用简单和自发的方式交换对象。OBEX协议能通过“推”、“拉”操作来传输对象。一个对象可通过多个“推”请求和“拉”应答进行交换。OBEX是一种类似于HTTP的协议,假设传输层是可靠的,采用客户机/服务器模式,独立于传输机制和传输应用接口API。

(4) 电子名片交换格式 (vCard)、电子日历及日程交换格式 (vCal)。它们都是开放性规范, 都没有定义传输机制, 只定义了数据传输格式。SIG 采用 vCard/vCal 规范, 是为了进一步促进个人信息交换。

(5) 无线应用协议 (WAP)。该协议是由无线应用协议论坛制定的, 它融合了各种广域无线网络技术, 其目的是将互联网内容和电话传送的业务传送到数字蜂窝电话和其他无线终端上。

另外, 协议还定义了主机控制器接口 (HCI), 提供对链路控制器和链路管理器的命令接口, 以及对硬件状态和控制注册成员的访问, 该接口还提供对蓝牙基带的统一访问模式。

3. 蓝牙应用规范

几种主要的蓝牙应用规范 (Profile) 如图 8-2 所示。蓝牙规范的应用模式有很多, 图中所示的 4 种应用模式是所有用户模式和应用的基础, 也为以后可能出现的用户模式和应用提供了基础。

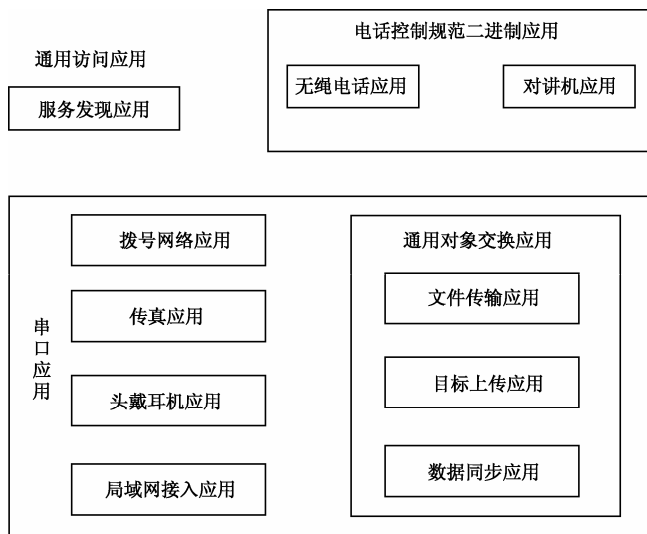


图 8-2 蓝牙应用规范示意图

1) 通用访问应用模式 (GAP)

通用访问应用模式定义了两个蓝牙单元之间如何相互发现和建立连接, 它用来处理未连接设备之间的相互发现和建立连接, 保证两个蓝牙设备不管是哪一家厂商的产品, 都能够发现设备支持何种应用, 并能够交换信息。蓝牙单元必须能够实现通用访问应用模式, 以保证基本的互操作性。

2) 服务发现应用模式 (SDAP)

服务发现应用模式定义了蓝牙单元可利用的服务发现, 处理已知和特殊的服务搜索, 包括服务发现用户应用, 这也是蓝牙单元的本地服务所必需的。服务发现协议的接口向其他蓝牙单元发出或接收服务请求, 因此服务发现应用模式描述了与特定的蓝牙协议之间的接口应用, 充分利用了终端用户的直接利益。

3) 串口应用模式 (SPP)

串口应用模式定义了怎样在两个蓝牙单元之间建立虚拟串口, 利用 RS232 (数据通信设备的通用接口标准) 控制信令可提供对蓝牙单元的串行线缆仿真。这种应用可保证 128kbps 的速

率，它依赖于通用访问应用模式。

4) 通用对象交换应用模式 (GOEP)

通用对象交换应用模式定义了处理对象交换的协议和步骤，文件传输应用和同步应用都基于这一应用，笔记本电脑、PDA、移动电话是这一应用模式的典型应用。通用对象交换应用以链路和信道都已建好为前提，描述了蓝牙单元的数据传输。通用对象交换应用模式依赖于串口应用模式。

8.1.3 蓝牙相关技术

蓝牙相关技术包括 WAP、3G 和无线局域网等技术。

1. 蓝牙与 WAP

1) WAP 概述

WAP 是一种能使移动用户利用无线设备方便地访问互联网资源，或使用交互式信息和服务的开放式全球规范。WAP 规范运行在成熟的 IP 和无线承载网络之上，针对无线网络的低带宽、高延迟等特点进行优化设计，为移动电话用户、寻呼机用户、个人数字助理用户和其他无线用户提供统一、开放、独立于接入网的互联网服务，把互联网的大量信息及通信业务引入到移动终端中。

WAP 标准是 WAP 论坛成员努力的结果。WAP 论坛是 1997 年 6 月，由诺基亚、爱立信、摩托罗拉和 phone.com 共同组成的一个行业协会，它支持现有的各个标准化组织，并向这些组织提供信息。该论坛旨在产生一个适用于不同无线网络技术的全球无线协议规范，供适当的工业标准组织采纳，将无线行业价值链各个环节上的公司联合在一起，以保证产品之间的互操作性和无线市场的发展。WAP 论坛已经发布一系列标准。1997 年 9 月，WAP 论坛出版了第一个 WAP 标准架构。次年 5 月 WAP1.0 正式推出，紧接着 WAP1.1 于 1999 年 6 月正式发行。1999 年 12 月 WAP1.2 正式发布，目前 WAP2.0 也已推出。

2) WAP 体系结构

WAP 模型如图 8-3 所示，该应用至少包括 3 个部分：Web 服务器、WAP 代理和 WAP 客户端。这种结构可以灵活地支持其他配置，为了实现端到端安全解决方案，可以建立一个含有 WAP 代理功能的源服务器。WAP 的内容和应用由一组基于 WWW 的内容格式来指定。WAP 内容的传输也采用基于 WWW 通信协议的一组标准通信协议进行。WAP 用户接口是无线终端内的微浏览器，与标准的 Web 浏览器很相似。

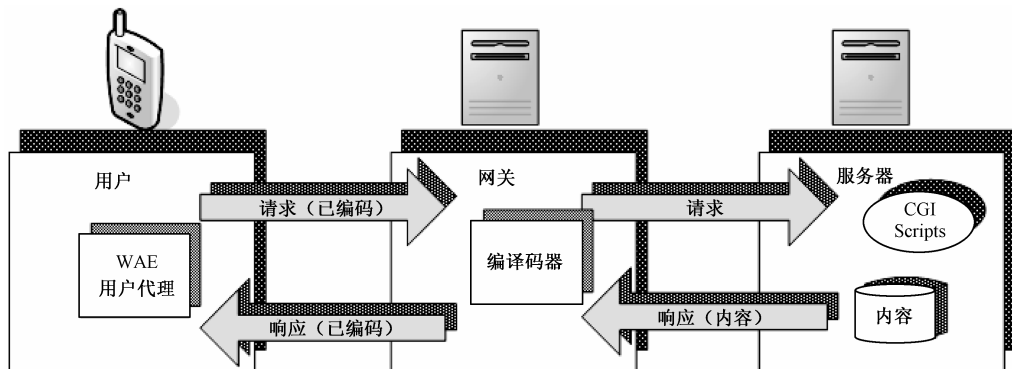


图 8-3 WAP 模型

WAP 网络结构如图 8-4 所示。图中，WAP 手机/客户端可以同时与无线网络中的两个服务器（WAP 网关和无线电话应用 WTA 服务器）进行通信。WAP 网关是一个代理服务器，它把来自客户端的 WAP 请求转化成 WWW 请求，同时对来自 Web 服务器的 WWW 响应进行二进制压缩编码，转换成客户端所能接收的格式。无线电话应用 WTA 服务器直接响应 WAP 客户端的请求，使之接入无线网络运营商的电信基础设施。WTA 框架允许从 WML Script 程序访问呼叫控制。电话簿和消息等电话功能，使得运营商可以开发安全的电话应用，并集成到 WML/WML Script 服务中。

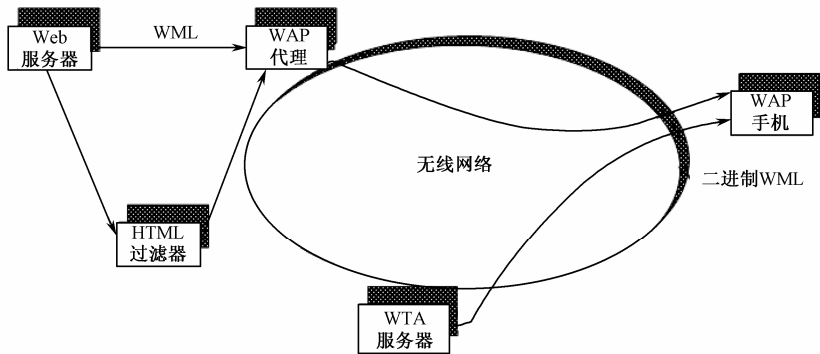


图 8-4 WAP 网络结构

WAP 体系结构如图 8-5 所示，分为应用层、会话层、事务层、安全层和传输层。通过协议栈的分层设计，WAP 体系结构为移动通信设备提供了一个层次化、可扩展的应用程序开发环境。WAP 体系结构中的每一层都为其上一层提供接入点。该分层结构还允许其他的服务和应用程序通过一组已经定义好的接口使用 WAP 协议栈，不同的外部应用程序可以从不同的层次接入 WAP 协议栈。

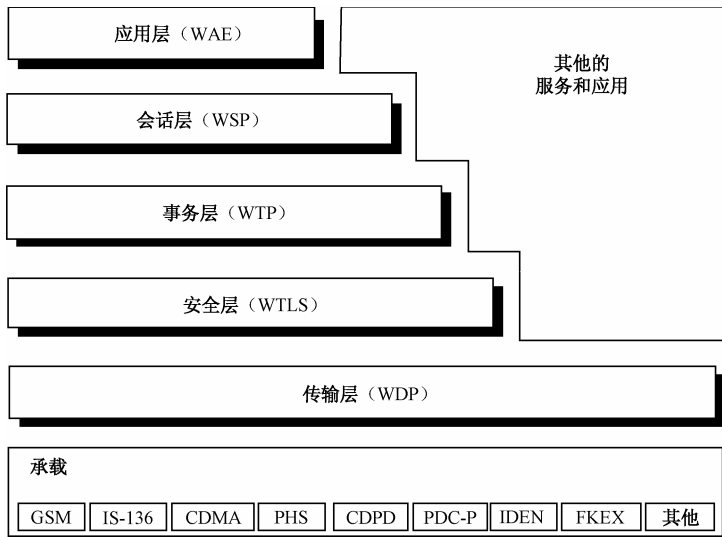


图 8-5 WAP 体系结构

WAP 在设计上独立于传输网络，适用于现有的大多数无线网络，如 CDDP、CDMA、GSM、PDC、TDMA、FLEX 等。因此，今天的 WAP 服务随着无线网络的发展，仍然可能继续存在，

不过传输速率会更快，协议标准也会进一步升级。WAP 协议的典型搭配如图 8-6 所示。

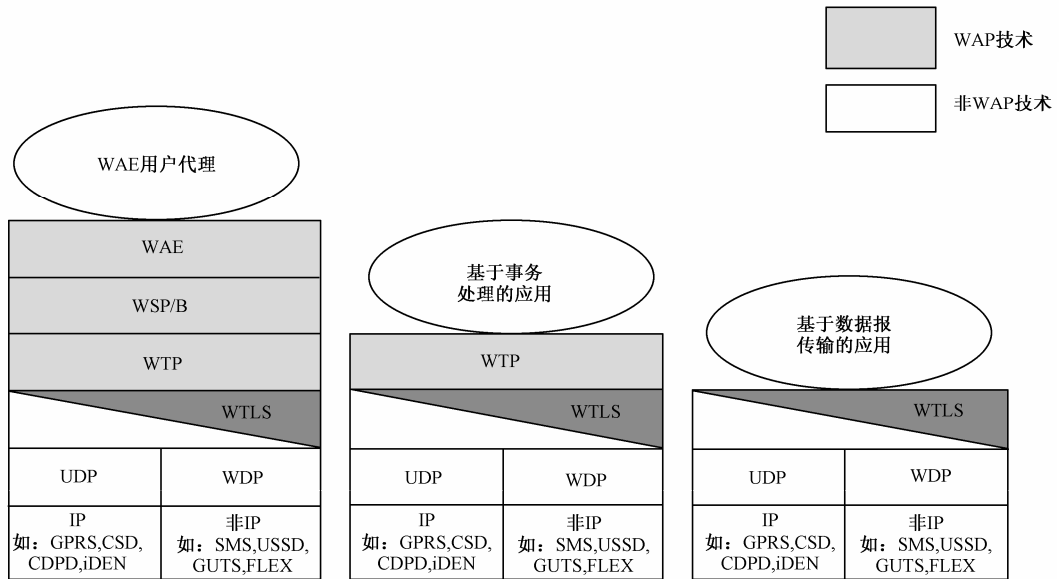


图 8-6 WAP 协议的典型搭配

2. 蓝牙与 3G

3G 是第三代移动通信的简称，1985 年由国际电信联盟提出，当时称为未来公众陆地移动通信系统，1996 年更名为 IMT-2 000，即该系统工作在 2 000MHz 频段，最高业务速率可达 2 000kbps。3G 数字移动通信系统具备通用无线寻址接入能力，可在全球范围内漫游，含多信息媒体、多传播介质、多层网络等特点。

3G 功能模型和接口如图 8-7 所示，主要由核心网、无线接入网、移动台和用户识别模块 4 个功能子系统构成。3G 的关键技术有初始同步、Rake 多径分集接收技术、功率控制、信道编译码、智能天线技术和空分多址、多用户检测等。3G 移动通信服务可能是决定蓝牙前途的关键。

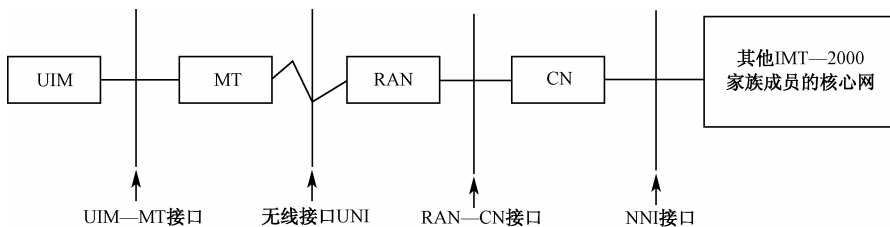


图 8-7 3G 功能模型和接口

3. 蓝牙与无线局域网

无线局域网（WLAN）是计算机间的无线通信网络。WLAN 的传输技术包括窄带正交频分复用技术、宽带扩展频谱技术、无线局域网的网络结构、星形拓扑结构、微蜂窝拓扑结构等。

1) 蓝牙与无线局域网

IEEE802.11 和蓝牙相比较，无线接入网络是当前发展最迅速的领域之一，相应的新技术层出不穷，IEEE802.11 和蓝牙都备受关注。它们的共同之处在于：都工作在 2.4GHz 频段；支持

移动联网，用户可以灵活地移动计算设备的位置，保持持续的网络连接；不需要使用物理线路，安装非常简便；因为无线网络所使用的高频率无线电波可以穿透墙壁或玻璃窗，所以网络设备可以在有消费人群的地方任意放置；多层安全防护措施可以充分确保用户隐私；改动网络结构或布局时，不需要对网络进行重新设置。无线局域网示意图如图 8-8 所示。

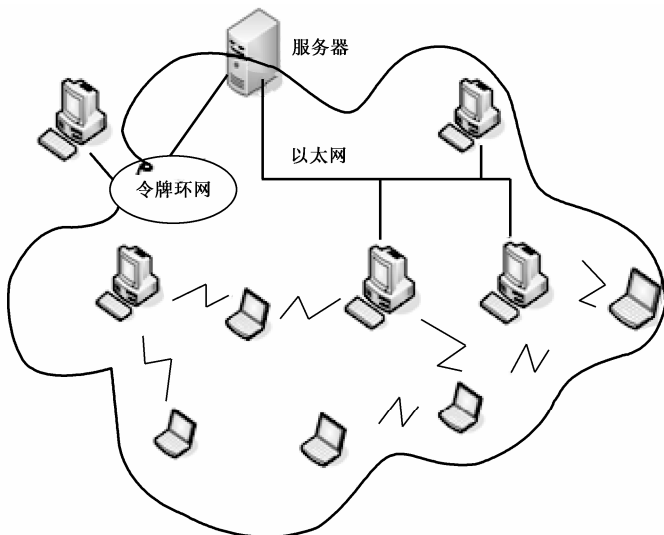


图 8-8 无线局域网示意图

IEEE802.11 规定了开放式系统互联参考模型的物理层和 MAC 层，能满足当今 WLAN 应用的数据传输要求，提供比蓝牙 1.0 标准更高的数据传输速率，但只支持数据通信。与 WLAN 不同之处是，蓝牙技术有一整套协议，可用于更多场合。蓝牙跳频更快，因而更稳定，同时还具有功耗更低和更灵活等特点。

2) 蓝牙与无线局域网干扰问题

目前，业界的发展趋势是在无线个人局域网中采用蓝牙 1.0 标准，这是因为在目前的标准下，在同一环境中使用 2.4GHz 频段的 WLAN 和蓝牙，尤其当二者相距较近时，常常会发生相互干扰，使数据传输速率降低。

蓝牙采用跳频扩频信令形式，带宽为 1Mbps。在 1MHz 带宽的 79 个频隙信道上，大约每秒跳变 1 600 次。蓝牙对 802.11b 的干扰强于 802.11b 对它的干扰，其原因在于蓝牙不停地跳到 802.11b 信号上，然后立即跳开，信息包损失很小，而且蓝牙设备能够不停地发送数据。

8.2

蓝牙的物理信道与链路

信道是信息传输的基础，可分为物理信道和逻辑信道。只有形成传输链路，才能保证信息的安全可靠传输。

8.2.1 物理信道

信道用伪随机跳频序列来表示，每个微网使用唯一信道跳频序列，它由主单元蓝牙设备地址确定，它的相位信号由主单元蓝牙时钟确定。信道分成时隙，每一时隙对应一个射频跳频点。

频率标称跳变速率为 1 600 跳/秒。微网内所有蓝牙单元在时间和跳频上均需要与信道同步。物理信道可以是时隙，也可以是频隙。

1. 频带及射频信道

蓝牙工作在 2.4GHz 的 ISM 频带。虽然该频带为全球开放，但对于不同国家和地区，其准确频率和频带宽度有所不同。在美国和欧洲大部分地区，使用带宽为 83.5MHz，其中定义了 79 个射频信道，每个信道（频隙）带宽 1MHz。在日本、西班牙和法国，带宽有所减小，定义了 23 个射频信道，每信道带宽 1MHz，如表 8-1 所示。

表 8-1 不同国家使用的频率和信道

国家和地区	频率范围	射频范围
欧洲及美国	2 400~2 483.5MHz	$f=(2\ 402+k)\text{MHz}$ ($k=0,\cdots,78$)
日本	2 445~2 497MHz	$f=(2\ 473+k)\text{MHz}$ ($k=0,\cdots,22$)
西班牙	2 445~2 475MHz	$f=(2\ 449+k)\text{MHz}$ ($k=0,\cdots,22$)
法国	2 446.5~2 483.5MHz	$f=(2\ 454+k)\text{MHz}$ ($k=0,\cdots,22$)

2. 时隙

信道分成时隙，如图 8-9 所示，一个时隙长度为 625μs。时隙根据微网内主单元蓝牙时钟进行编号，其编号范围为 0~(2²⁷-1)，周期为 2²⁷ 个时隙。在时隙中，主单元和从单元以时分复用方式交替传输分组。

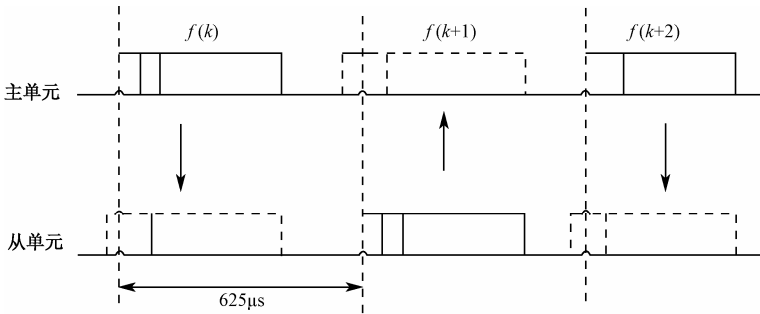


图 8-9 时分复用方式传输与定时

主单元仅在偶数时隙开始传输分组，从单元仅在奇数时隙开始传输分组，分组起点与时隙起点相吻合。由主单元或从单元传输的分组，可扩展至覆盖 5 个时隙，如图 8-10 所示。

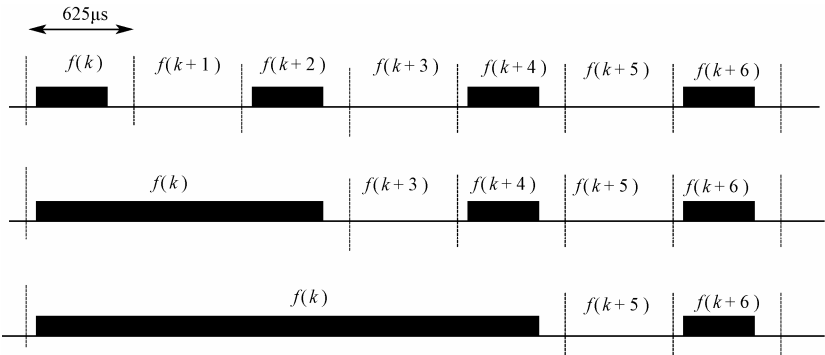


图 8-10 多时隙分组跳频变化示意图

传输分组期间跳变射频保持不变。对于传输单时隙分组，使用的跳频由当前蓝牙时钟值导出；对于传输多时隙分组，跳频根据传输首时隙时钟值导出。传输多时隙分组后，传输下一分组的跳频也根据该分组首时隙时钟值确定。图 8-10 说明了单时隙分组和多时隙分组情况下的跳频变化方式。当传输分组占用信道超过一个时隙（多时隙分组情况）时，使用的跳频就是首时隙确定的跳频。

8.2.2 物理层链路

在主单元与从单元之间，可以建立同步链路（SCO）和异步链路（ACL）两种不同类型链路。

1. 同步链路

同步链路是微网主单元与特定从单元之间对称点对点链路。SCO 链路使用保留时隙运行 SCO 链路来传输分组，可以看做主单元与从单元之间的电路交换型连接。典型情况下，SCO 链路支持限时信息（如语音）。主单元能够支持多达 3 路 SCO 链路，这些链路指向相同从单元或不同从单元。如果链路来自同一主单元，则从单元能够支持多达 3 路 SCO 链路；如果链路来自不同主单元，则从单元能够支持两路 SCO 链路。SCO 分组不重传。

主单元以规则时间间隔传输分组，该规则间隔称为主→从时隙，保留时隙指向从单元的 SCO 间隔 T_{SCO} （单位为时隙）。在随后从→主时隙中，总是允许 SCO 链路从单元以 SCO 分组应答主单元，除非在前一个主→从时隙分组寻址的是其他从单元。如果 SCO 从单元在收到分组头中解析从单元地址失败，仍允许该从单元返回 SCO 分组。

主单元通过发送链路管理协议的建链消息来建立 SCO 链路，该消息携带有关定时参数，如 SCO 间隔 T_{SCO} 及说明保留时隙的偏移量 D_{SCO} 。

为了防止发生时钟“卷绕”问题，建链消息中初始化标志指明使用初始化 1 或初始化 2。初始化 1 与初始化 2 是指确定初始传输时隙的两种方式。从单元根据该初始化标志，确定相应初始化方式。如果当前主单元时钟 MSB（CLK₂₇）为“0”，则主单元使用初始化 1；如果 MSB 为“1”，则主单元使用初始化 2。

初始化 1 与初始化 2 对应的确定初始传输时隙方式如式（8-1）所示。

初始化 1 $CLK_{27-1} \bmod T_{SCO} = D_{SCO}$ 初始化 2 $(\overline{CLK_{27}}, CLK_{26-1}) \bmod T_{SCO} = D_{SCO}$ (8-1)

式中， $\overline{CLK_{27}}$ 、 CLK_{26-1} 为第 27 位反相的 CLK₂₇₋₁。从→主 SCO 时隙紧随主→从保留时隙。启动传输后，下一个主→从时隙对应时钟值 CLK(k+1)根据式（8-2）计算。

$$CLK(k+1) = CLK(k) + T_{SCO} \quad (8-2)$$

式中，CLK(k)为当前主→从 SCO 时隙时钟值。

2. 异步链路

ACL 链路是主单元与微网内所有从单元间点对多点链路。在非 SCO 保留时隙，主单元以时隙为单位与从单元交换分组。在主单元与加入微网的所有从单元之间，ACL 链路提供分组交换型连接和异步及等时服务。主单元与一个从单元间只能存在一条 ACL 链路。对于多数 ACL 分组，采用分组传输确保数据完整性（正确性）。

当从单元在前一个主→从时隙被寻址时，从单元允许在从→主时隙返回 ACL 分组。如果它对于接收的分组头中从单元地址解析失败，则不允许返回 ACL 分组，这一点与前述 SCO 分组情况有所不同。

未指定接收从单元地址的分组视为广播分组，可由所有从单元接收。如果 ACL 链路没有

数据传输，也不需要轮询，则不发生任何传输过程。

8.3

蓝牙分组与数据通信

在一个蓝牙微网的信道中，数据以分组的形式传输。

8.3.1 蓝牙分组

1. 分组通用格式

蓝牙的标准分组格式如图 8-11 所示，每一个分组由识别码、分组头和有效载荷 3 部分组成。识别码和分组头的长度是固定的，分别为 72 位和 54 位。有效载荷的长度可以在 0~2 745 位变化。

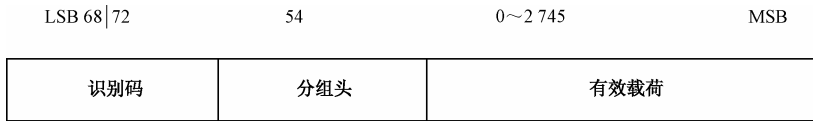


图 8-11 蓝牙的标准分组格式

分组方式有几种不同类型，例如，可以仅由识别码组成（缩短格式），也可以由识别码和分组头组成，或者由识别码、分组头和有效载荷共同组成。图 8-11 所示格式中左边为最低标识位（LSB），右边为最高标识位（MSB）。分组在传送期间没有跳频，并且在频率保持期间至多有一个分组传送。空间中的发送从 LSB 开始逐步到 MSB。每一个分组的发送都利用识别码作为微网的标识，协议规定数据发送从 LSB 即最低位开始。

1) 识别码

信道上的每个分组都以识别码作为开始，分组中识别码主要用于时钟同步、DC 补偿平衡和身份识别，可以过滤从其他微微网中接收到的传送。在同一个微微网中发送的所有分组都有相同的信道识别码，从而可对微微网信道上交换的所有分组进行识别。接收设备通过滑动相关器与识别码相关，当超过门限电平激发，并用该激发信号确定接收定时。识别码也可用于呼叫和查询过程，在这种情况下识别码可单独作为信令消息，而不需要分组头和有效载荷。

典型的识别码由头和同步字组成，有时还包括尾。识别码的长度一般是 72 位，其中包括 4 位的尾字段。当分组不包含尾字段时，分组仅包括 68 位的识别码，68 位的分组专门应用于查询和呼叫发送。呼叫码的格式如图 8-12 所示。

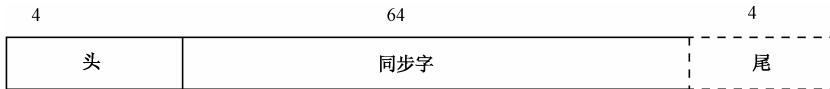


图 8-12 呼叫码的格式

识别码有 3 种类型：信道识别码（CAC）、设备识别码（DAC）和查询识别码（IAC）。其中查询识别码又包括通用查询识别码（GIAC）和专用查询识别码（DIAC）。识别码中，头是用于 DC 补偿的序列。如果后序同步字的 LSB 为 1，该序列为 1010；如果后序同步字的 LSB 为 0，该序列为 0101。同步字是一个由 24 位低地址部分（LAP）导出的 64 位代码字。

2) 分组头

分组头的格式如图 8-13 所示，头字段中包含链路控制数据，帮助中间接入控制。头字段为了降低开销，包括 HEC 在内仅 18 位的信息，采用前向纠错编码方法，在特殊情况下，头字段的每一个比特在序列中发送 3 次，即利用 1/3 比例前向纠错编码提高发送的可靠性，经 1/3 比例 FEC 后变为 54 位的代码字段。分组头由 6 个字段组成：AM_ADDR、TYPE、FLOW、ARQN、SEQN、HEC。

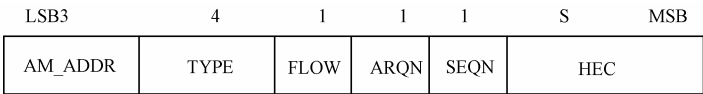


图 8-13 分组头的格式

3) 有效载荷

有效载荷中有两种字段应区分开：（同步）语音段和（异步）数据段。ACL 分组只含数据段，而 SCO 分组只含语音段。DV 分组则同时含有语音段和数据段。

语音段的长度是固定的。对于 HV 分组，语音段长度为 240 位；对于 DV 分组，语音段长度为 80 位。语音段不需要带有有效载荷头。

数据段由有效载荷头、有效载荷主体和 CRC 码 3 部分组成，只有数据段才带有有效载荷头。有效载荷头长度为一个或两个字节。第一和第二个段的分组有效载荷头为一个字节，第三个和第四个段的有效载荷头为两个字节。有效载荷头的格式如图 8-14 所示。

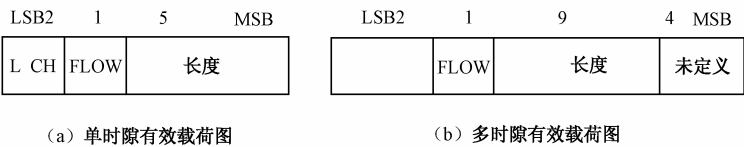


图 8-14 有效载荷头的格式

2. 分组类型

蓝牙微微网中分组的类型与它们的链接方式有关。对于 SCO 和 ACL 两种链接方式，每种都有 12 种不同类型的分组，此外还有 4 种为这两种链接方式通用的控制分组。这些分组用 4 位二进制码的不同组合来表示，每种分组类型对应一个分组码。通用分组的分组码是唯一的，与链接方式无关。

1) 通用分组

链路控制分组包括 ID 分组、NULL 分组、POLL 分组和 FHS 分组。

2) ACL 分组

ACL 分组表示为 DM1、DM3、DM5、DH1、DH3、DH5，其中 DM 是载荷利用 2/3 率 FEC 编码的中速数据，DH 是载荷利用 FEC 编码的高速数据。大小等于 1、3 或 5，表示分组占有的时隙数。它们的 FEC 编码是无 FEC、2/3 率 FEC 编码、1/3 率 FEC 编码。

3) SCO 分组

SCO 分组具有一个时隙长，表示为 HV1、HV2、HV3。3 个变量表示对载荷采用不同的编码方式，通过周期性保留时隙，均支持在每一个方向上的 64kbps 速率。其中 HV 表示高质量声音，编码质量为 1、2 或 3 表示对载荷的不同编码。

8.3.2 蓝牙的收发规程

1. 发送规程

每一条 ACL 链路及 SCO 链路都独立执行各自的发送规程。关于如何使用 ACL 及 SCO 缓存区,可参见图 8-15。图中仅画出单路 ACL 缓存与 SCO 缓存部分。在主单元内,对于每一个从单元都设有单独 ACL 发送缓存区;对于 SCO 从单元,可以设置一个或多个 SCO 发送缓存区(不同 SCO 链路可以共用相同缓存区,或者拥有独立缓存区)。每个发送缓存区由两个先入先出寄存器(FIFO)组成,其中“当前”寄存器由蓝牙链路控制器准备打包使用,“其次”寄存器由蓝牙链路管理器加载信息使用。开关 S_1 与 S_2 的位置决定哪一个是“当前”寄存器,哪一个是“其次”寄存器。开关由蓝牙链路控制器控制。FIFO 寄存器输入、输出开关不能同时连接同一个寄存器。FIFO 寄存器输入、输出开关不能同时连接同一个寄存器。

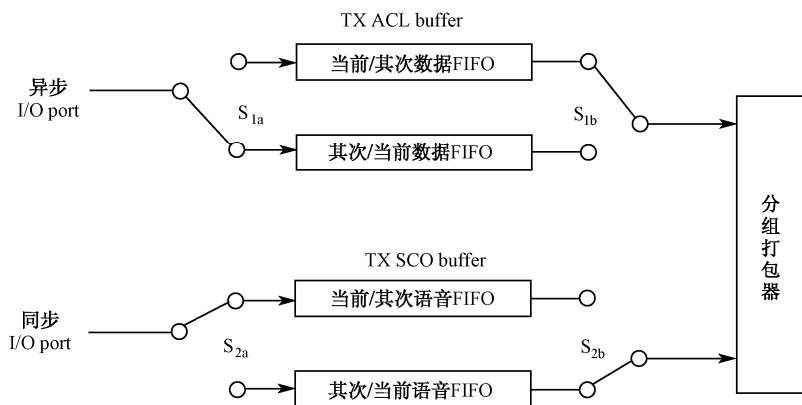


图 8-15 发送缓存功能示意图

在 ACL 与 SCO 公用分组(ID、NULL、POLL、FHS、DM1)中,只有 DM1 分组携带的有效载荷能够在链路管理器和链路控制器之间进行交换。该分组使用 ACL 缓存区,所有 ACL 分组使用 ACL 缓存区,所有 SCO 分组使用 SCO 缓存区。DV 分组除外,它的语音部分使用 SCO 缓存区,数据部分使用 ACL 缓存区。

2. 业务流分析

在发送规程中,涉及 ACL 业务流、SCO 业务流及 SCO 链路上的数据/语音混合业务流。

1) ACL 业务流

在传输纯(异步)数据情况下,只考虑 ACL 发送缓存区。这时只使用 DM 或 DH 分组。它们具有不同分组长度,长度由有效载荷头指明。选择高速率还是中速率数据分组,取决于链路质量。若链路质量较高,则有效载荷部分可省略 FEC,因而使用 DH 分组。否则,必须使用 DM 分组。

在纯数据业务流中,默认类型是 NULL 分组。这意味着,如果没有数据发送(异步数据业务流无数据发送时处于暂停状态)或者没有从单元需要轮询,则发送空分组,以便发送链路控制信息(如用于数据接收的 ACK/STOP 信息)到其他蓝牙单元。如果链路控制信息也不需要发送,则不发送任何分组。

ACL 业务流发送规则是:蓝牙链路管理器将信息载入由开关 S_1 指向的寄存器,然后向蓝牙链路控制器发出刷新(FLUSH)命令,这将使 S_1 发生切换(S_{1a} 、 S_{1b} 同时切换)。当需要发送载

荷时,打包器读取“当前”寄存器,根据分组类型构造分组有效载荷,加在分组信道访问码及分组头之后发送。在收到回答分组后(主单元在随后接收RX时隙收到,从单元可能推迟几个接收时隙收到),得到对上次发送的确认结果。如果是“ACK”,开关 S_1 发生切换;如果是“NAK”(不论是显式还是隐式), S_1 不发生切换,并在下一个发送(TX)时隙重发有效载荷。

只要链路管理器向寄存器持续载入新信息,链路控制器将自动发送有效载荷,并在出错情况下自动实现重发。当没有新信息载入寄存器时,链路控制器将发送NULL分组或不发送分组。如果上一次发送期间没有新数据载入“其次”寄存器,则上次发送分组得到确认后,“其次”寄存器变成“当前”寄存器,打包器将指向空载寄存器。如果新数据载入“其次”寄存器,则需要刷新命令,促使开关 S_1 切换到满载寄存器。在每个发送(TX)时隙之前,只要链路管理器持续向数据与类型寄存器载入内容,则链路控制器将自动处理数据,因为开关 S_1 由收到的ACK信息控制。来自链路管理器的通信流一旦中断,则发送默认分组。这时可通过使用刷新命令来继续链路控制器中的通信流。

刷新命令也可用于时限数据(等时数据)情况,当链路质量恶化时,分组需要多次重传。在某些应用场合,数据有时限性,这时一个有效载荷如果因链路质量恶劣而始终处于重发状态,就可能成为“过期”数据。系统可以决定跳过无法成功传输的数据而继续下一个新数据传输,这要通过刷新命令来实现。该命令强制开关 S_1 发生切换,强制链路控制器忽略ACK机制而考虑下一个载荷数据。

2) SCO 业务流

在SCO链路上,一般情况下仅使用HV分组。同步接口持续地将数据载入SCO缓存区中的“其次”寄存器。开关 S_2 根据 T_{SCO} 间隔进行切换, T_{SCO} 参数由主单元与从单元在SCO链路建立时商定。

在每一个SCO开始时隙,打包器在开关 S_2 发生切换后读取当前寄存器内容。如果使用SCO时隙发送高优先级控制信息分组,该分组涉及主单元与有关SCO从单元,或主单元与任何其他从单元,则分组打包器将丢弃SCO信息而使用控制信息。链路控制信息也可以在主单元与SCO从单元间使用DV分组或DM1分组进行交换。

3) 数据/语音混合业务流

前述“SCO分组”中定义了DV分组,该分组在一条SCO链路上同时承载数据与语音信息。当分组类型是DV时,链路控制器读取数据寄存器充分组数据段,读取语音寄存器充分语音段。之后,开关 S_2 发生切换。开关 S_1 的位置取决于传输结果,就像ACL分组情况一样,只有当收到ACK信号后, S_1 才发生切换。在每一个DV分组中,语音信息总是新信息,而数据信息可能是重传信息,如果前一次传输失败,又没有数据需要发送,SCO链路就将DV分组类型自动转换为数据/语音混合传输前的HV分组类型。当又有新数据要发送而中断语音流时,需要使用刷新命令。在信道容量允许情况下,数据/语音混合传输也可以通过使用分开的SCO链路与ACL链路实现。

4) 默认分组类型

在ACL链路上,对于主单元与从单元来说,默认分组总是NULL分组。即如果没有用户信息发送,则发送NULL分组或者不发送任何分组。主单元可利用NULL分组,将下一个从→主单元时隙分配给某从单元(单一寻址)。但是,从单元不一定必须响应主单元NULL分组。如果主单元需要从单元应答,必须发出POLL分组。对SCO分组类型,当SCO链路

建立时，在链路管理（LM）层上可以对默认类型进行商定。协商后的分组类型就是 SCO 链路的默认类型。

3. 接收规程

ACL 链路和 SCO 链路执行不同的接收规程。在发送规程中，主单元对各个从单元设有独立 ACL 发送缓冲区。但是在接收规程中，主单元内所有从单元共享一个 ACL 接收缓存区；而 SCO 缓存区使用方式将取决于如何区分不同 SCO 链路，从而决定是否需要额外的 SCO 缓存区。

接收规程中，使用 ACL 缓存区和 SCO 缓存区的情况如图 8-16 所示，接收 ACL 缓存区由两个先入先出（FIFO）寄存器组成，其中一个寄存器由链路控制器载入最新收到分组有效载荷，另一个寄存器由链路管理器读取前一分组有效载荷。接收 SCO 缓存区也由两个 FIFO 寄存器组成，其中一个寄存器由刚收到的语音信息填入，另一个寄存器由语音处理单元读取。因为接收分组头中类型代码指明了有效载荷是数据还是语音，所以分组拆包器能自动地引导业务流到恰当缓存区。每当链路管理器读取寄存器时，开关 S_1 切换一次。如果下一个载荷在接收寄存器清空之前到达，则必须在返回分组头中设置“STOP”指示。该指示在接收寄存器清空后立刻取消。

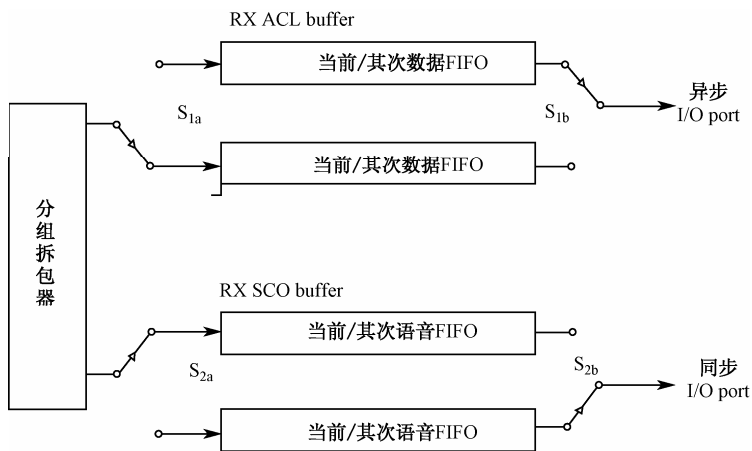


图 8-16 接收缓存功能示意图

开关 S_2 每隔 T_{SCO} 切换一次。如果由于分组头出错，影响接收语音载荷，该开关仍旧切换，这时语音处理单元将按语音丢失情况进行处理。

8.3.3 蓝牙逻辑信道

在蓝牙系统中，定义了链路控制（LC）信道、链路管理（LM）信道、用户异步数据（UA）信道、用户等时数据（UI）信道和用户同步数据（US）信道 5 种逻辑信道。

用户信道 UA、UI 及 US 分别用于携带异步、等时及同步用户信息，其余信道由分组有效载荷承载。LM、UA 及 UI 信道由分组有效载荷头中 L-CH 标志指明。

1. 链路控制（LC）信道

链路控制信道被映射到分组头中，由分组头承载，该信道携带低层控制信息，如 ARQ、流控及有效载荷特征。除 ID 分组外（因为 ID 分组没有分组头），其他类型分组均可以承载 LC 信道。

2. 链路管理 (LM) 信道

链路管理信道携带控制信息, 这些信息在主单元与从单元链路管理器之间进行交换。典型情况下, LM 信道由具有纠错保护的 DM 分组承载, 由有效载荷头中标志 L-CH 代码“11”指明。LC/LM 控制信道分别在链路控制层/链路管理层使用。LM 信道既可由 SCO 链路承载, 也可由 ACL 链路承载。

3. 用户异步/等时数据 (UA/UI) 信道

UA 信道透明携带控制适配协议异步用户数据, 该数据使用一个或多个基带分组进行传输。对于分段消息, 起始分组用有效载荷头中标志 L-CH 代码“10”指明, 后续分组用代码“01”表示。如果链路控制适配协议消息没有分段, 则所有消息分组用 L-CH 代码“10”表示。

等时数据信道由高层定时启动的分组承载, 在基带层, 它的 L-CH 代码用法与 UA 信道情况相同。UA/UI 信道通常由 ACL 链路承载, 也可由 SCO 链路上 DV 分组中数据部分承载。

4. 用户同步数据 (US) 信道

用户同步数据 (US) 信道透明传输同步用户数据, US 信道仅由 SCO 链路承载。

5. 信道映射

LC 信道映射到分组头, 其他信道则映射到分组有效载荷。US 信道只能映射到 SCO 分组, 其他信道映射到 ACL 分组或 SCO 链路的 DV 分组。如果传输的信息具有较高优先权, 则 LM、UA 和 UI 信道可以中断 US 信道。

8.3.4 蓝牙的信道控制

1. 主从定义

一个微微网最多可以有 8 个蓝牙设备, 其中一个为主单元, 即是发起连接的单元, 其他被连接的设备为从单元。主单元蓝牙设备地址 (BD-ADDR) 确定跳频序列及信道识别码。只有在蓝牙设备成为微微网的成员后, 主、从单元的定义才有意义。一个蓝牙设备既可以做主单元, 也可以做从单元 (主从角色转换), 要根据应用的要求来决定。

2. 主从角色转换

主单元和从单元之间可以相互交换角色, 某个微微网主单元可转变成新的微微网的成员, 在新的微微网中, 原来的主单元变成从单元, 而原来的某个从单元变成新的主单元。

3. 状态描述

蓝牙设备的操作状态如图 8-17 所示, 包括连接状态 (Connected) 和待机状态 (Standby) 两个主状态。另外还有 7 种子状态, 分别为呼叫 (Page)、呼叫扫描 (Page Scan)、查询 (Inquiry)、查询扫描 (Inquiry Scan)、主单元应答 (Master Response)、从单元应答 (Slave Response) 和查询响应 (Inquiry Response)。子状态用于向微微网增加新的从单元的过渡状态。要从一个状态转移到另一个状态, 需要用到链路管理命令或链路控制器的内部信令。

待机状态是蓝牙单元的默认状态, 在这种状态下, 设备除了本地时钟以低功率模式驱动外, 其他功能都处于闲置状态。当蓝牙单元处于连接状态时, 它是微微网的成员。当蓝牙单元与任何微微网都无关, 或者没有参与设备形成而加入微微网时, 它处于待机状态。从待机状态转到连接状态, 需要经过查询和呼叫状态, 这两种状态是两种不同的情况, 但在潜在主单元和潜在从单元中是互补的。

在查询状态, 设备在其他范围内搜寻其他设备标识, 其他设备必须处于查询扫描状态, 随

时监听和响应查询。而在呼叫状态,设备以主单元的身份请求其他设备加入微微网,其他设备必须处于呼叫扫描状态,随时监听和响应呼叫。如果已经知道设备的标识,设备可以越过查询状态。当某个设备是微微网的成员时,它仍然执行查询和呼叫状态,以便其他设备加入到本微微网或其他微微网中。当有其他微微网加入时,会产生一个散射网。

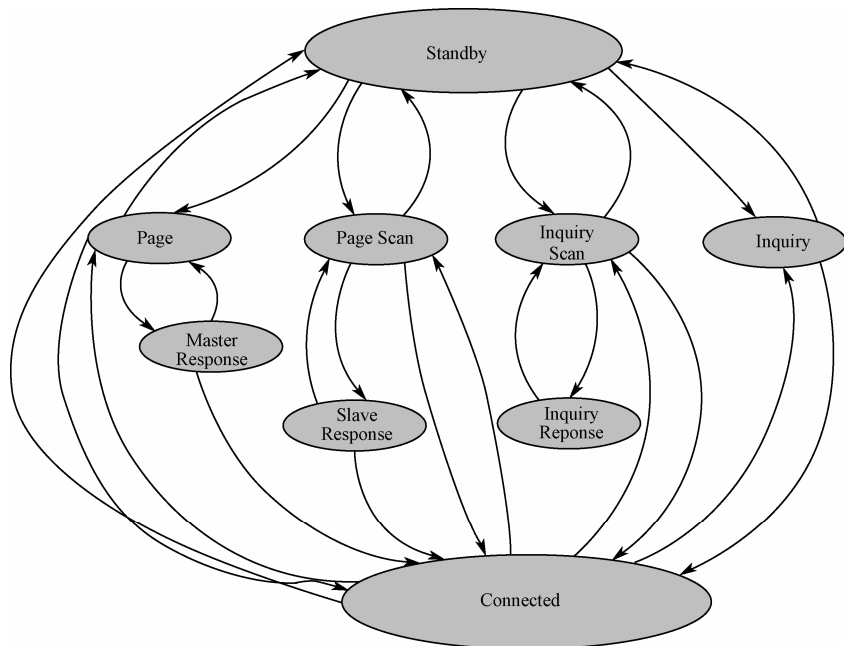


图 8-17 蓝牙设备的操作状态

4. 微微网操作

在微微网操作过程中,采用了信道跳变序列。对于信道跳变序列,微微网中所有设备的 FSM 输入地址包含 28 位的主单元蓝牙设备地址 BD-ADDR。信道序列的周期非常长,但 23 信道或 79 信道的跳频被平均分配了非常短的时间周期,以满足跳频序列的调整要求。

在微微网的操作过程中,每隔 $625\mu\text{s}$ 就选择一个新频率,时钟比特的两次时间间隔 $625\mu\text{s}$ 称为一个时隙。对处于连接状态的设备,时隙边界与主单元时钟的比特一致。微微网中的所有设备,利用当前的主单元时钟值获得它们的 FSM。

在某一频率的驻留过程中,设备可能传送一个单元组的信息,称为基带分组数据单元 (BB-PDU)。BB-PDU 在频率驻留时间内受到严格限制,其驻留保持时间可能占用多个时隙,因此允许多个时隙的 BB-PDU 传送。在多个时隙 BB-PDU 的传送过程中,下一个频率的选择,是按照单时隙传送时所应使用的频率。也就是说,尽管跳频在 BB-PDU 基础上产生,从信道跳变序列得到的频率是以单时隙为基础选择的。

在操作过程中,每一个基于信道跳变序列所提供的频率点上的传送,都要在其前面加入信道识别码 (CAC),CAC 利用微网主单元的地址 LAP 产生。只有包含合适的信道识别码的传送才会被设备接收。

5. 蓝牙设备的操作状态

蓝牙设备具有 3 种操作状态,连接 (Connected)、查询 (Inquire) 和呼叫 (Page)。

1) 连接状态

连接状态的时钟和地址都来自主单元, 识别码为信道识别码 (CAC), 与主单元的设备识别码 (DAC) 一致。在连接状态下, 主单元可以控制交换数据, 并确定发送设备和发送时间。为保持微微网的同步性, 每一个从单元计算自己的时钟与主单元时钟的偏差, 在本地时钟上增加偏移值。因此, 主单元的时钟成为微微网中定时事件的调整器。另外, 主单元的 LAP 用于识别码。

当微微网中所有的设备使用统一的参考时钟时, 微微网的发送时隙被分为主单元发送时隙和从单元发送时隙。主单元在偶数时隙 ($c_1=0$) 开始发送, 从单元在奇数时隙 ($c_1=1$) 开始发送。仅在最后的主单元发送是专门指定为特殊从单元时, 特殊从单元才开始发送。因此, 蓝牙通信的媒体接入协议是基于时分双工 (TDD) 的轮询方案。主单元和从单元发送时隙每隔 $625\mu\text{s}$ 交替一次, $625\mu\text{s}$ 为同一频率的驻留时间, 也可以是多时隙传送。但多时隙的发送限制为奇数时隙 (1, 3, 5, ...), 从而必须保证主单元总是在偶数时隙开始发送, 从单元发送在奇数时隙开始。

连接状态以主单元发送的轮询 (POLL) 分组为起点, 检查主单元的定时和信道跳频的切换, 从单元可以用任何类型的分组响应。如果从单元没有收到 POLL 分组, 或主单元没有收到关于 “newconnection TO” 时隙数的响应分组, 双方设备将返回呼叫或呼叫扫描子状态。连接状态的第一个信息分组包括控制信息, 描述链路特性并提供关于蓝牙单元的细节, 这些信息在单元的链路管理器之间交换。通过 Detach 或 Reset 命令可以离开连接状态, 如果链路以正常的方式断开连接, 则会使用 Detach 命令, 而蓝牙链路控制器的配置数据仍然有效。Reset 命令用于整个控制器处理强制重启, 在 Reset 后, 控制器重新配置。

蓝牙单元在连接状态下可以处于活动 (Active) 模式、呼吸 (Sniff) 模式、保持 (Hold) 模式和待机 (Park) 模式等多种操作模式中。

2) 查询状态

查询状态的时钟是本地时钟, 地址为 GIAC, 识别码为通用或专用查询识别码 (GIAC 或 DIAC)。在蓝牙系统中, 查询过程用于接收设备地址不被发端所知的应用, 而且查询过程也可用于发现在范围内的其他蓝牙单元。在查询子状态中, 发现单元搜集所有应答查询消息的蓝牙单元地址和时钟。

查询状态是由主单元和从单元执行的几个子状态组成的。主单元执行查询状态, 从单元执行查询扫描状态和查询响应状态。在查询状态中, 主单元发送查询分组, 从单元在查询扫描状态时接收此分组, 随后从单元进入查询响应状态, 并向主单元传送它们的基本信息。在需要的时候, 可以通过呼叫过程同其中任何一个建立联系。

当设备处于各种查询子状态时, 设备利用查询序列发送和接收分组。由发送端广播的查询消息不含有任何有关发送端的信息, 但它将指出应答设备的类型。使用通用查询设备识别码 (GIAC) 可以查询到任何蓝牙设备, 使用一些专用查询识别码可查询指定类型设备。查询识别码取自保留的蓝牙设备字。

如果某单元希望发现其他蓝牙单元, 则此单元将进入查询子状态。在查询子状态中, 它将连续以不同的跳频传送查询消息 (ID 分组)。查询跳频序列总是取自 GIAC 的 LAP。这样, 当使用 DIAC 时, 应用的跳频序列将由 GIAC 的 LAP 产生。允许被发现的单元会有规律地进入查询子状态, 并对查询消息做出响应。查询应答是可选的, 单元并未要求必须

响应查询消息。

为了响应查询,从单元发送 FHS 分组,其中包含从单元的蓝牙单元地址和时钟值。由于主单元或从单元都可以发送 FHS 分组,FHS 的字段中标明了发送分组的设备,它按照从 LSB 到 MSB 的顺序在传送中提供它们的字段和比特。承载 FHS 分组的蓝牙单元地址的头字段中包含了 AM-ADDR 字段,当设置为全零时,表明是一个广播分组。FHS 分组使用 2 字节 CRC,并且采用 2/3 率 FEC 编码。

概括地说,主单元可以在不同的查询序列的频率点上发送它的查询 ID 分组,并且可根据需要快速改变发送频率,使从单元能够监听到其中一个频率。从单元执行查询扫描时,以较慢的速率改变监听频率点。由于主单元不知道从单元在什么时候监听查询,因此主单元需要多次重复查询。当最终建立联络后,从单元利用包含呼叫信息的 FHS 分组做出响应。由于查询或监听设备的 SCO 传送优先于查询过程,设备在执行查询过程之前首先发送和接收 SCO 分组。

3) 呼叫状态

设备呼叫的目的是邀请被呼叫设备加入微微网,主单元是呼叫设备。呼叫设备使用呼叫设备的地址 BD-ADDR 和时钟估计值发送它的呼叫。呼叫状态包括:几个在主单元和从单元之间执行的子状态,主单元执行的呼叫子状态和主单元响应子状态,从单元执行的呼叫扫描子状态和从单元响应子状态。

在呼叫子状态,主单元发送呼叫蓝牙单元地址,由处于呼叫扫描子状态的从单元接收,呼叫传送仅包含从单元的 DAC,此基带分组称为从单元 ID 分组。在它的呼叫响应中,从单元也发送从单元 ID 分组,主要目的是通知主单元它已经收到呼叫。最后,主单元进入主单元响应子状态,在此期间主单元向从单元发送它的基本元素和从单元的 AM-ADDR,允许从单元参加微微网的通信。这些基本元素和 AM-ADDR 在 FHS 分组中传送。从单元利用一个从单元 ID 分组响应,并且进入连接状态,准备开始微微网通信。

主单元和从单元在呼叫和呼叫扫描子状态的操作,分别类似于前面讨论的查询和查询扫描操作。 T_{pagescan} 的典型值是 1.28s,重复呼叫次数 N_{page} 的典型值是 128,这些典型值应用就是所谓的 R1 呼叫模式。在查询的从单元 FHS 发送过程中或正常通信的链路管理器信息交换过程中,呼叫模式及对应的参数 T_{pagescan} 和 N_{page} 被传递给主单元。

在 79 个信道的情况下,A 列和 B 列都包含呼叫序列的 16 频率点;在 23 个信道时,只有一列含有 16 个频率点。在前一种情况下,A 列包含的 16 频率点接近于从单元监听呼叫的频率,这些频率点是由主单元利用其对应从单元本地时钟的了解而估计的,B 列包含呼叫序列的保留频率。然而由于 B 列是在 A 列的频率点传送呼叫 1.28s 后使用,主单元知道从单元的监听频率也将改变,因此,A 列和 B 列有同样的频率。

呼叫操作过程中的传送序列如图 8-18 所示,该图表示主单元呼叫从单元的过程。随着呼叫操作过程的完成,从单元加入微微网进行通信。因此,从单元不仅需要知道主单元的 BD-ADDR 和时钟值,还必须有一个主单元分配的 AM-ADDR 地址,必须知道主单元传送时隙的开始。AM-ADDR 被包含在 FHS 分组中传送给从单元,此分组的传送时间被用来确定微微网主单元传送时隙的开始。主单元在它的传送时隙开始向从单元发送 FHS 分组,而不管从单元是否发送了它的从单元 ID 分组。

与查询状态一样,SCO 传送可以在呼叫过程中、呼叫设备或被呼叫设备中产生,设备将在

呼叫之前发送和接收 SCO 分组。

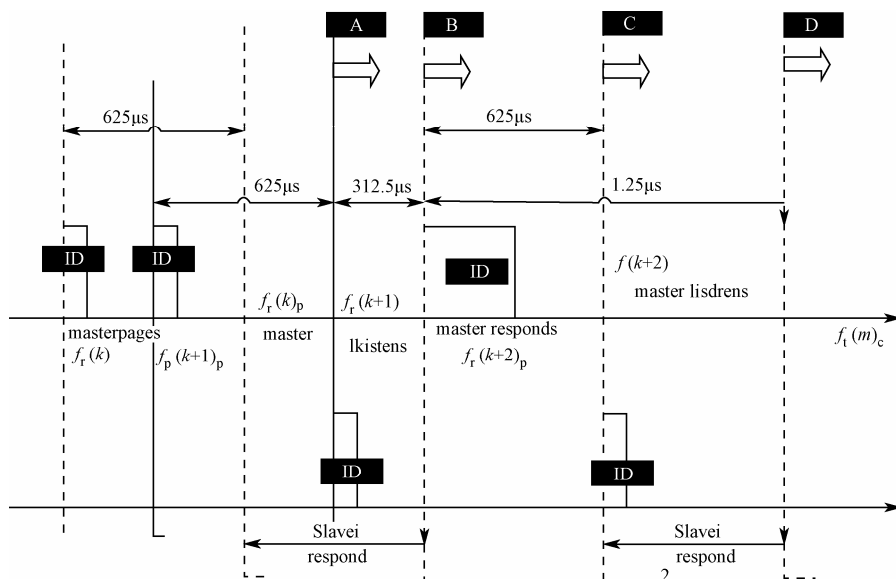


图 8-18 呼叫操作过程中的传送序列

8.4

蓝牙信息安全

蓝牙技术提供短距离的对等通信。为了提供应用保护和信息保密，系统必须在应用层和链路层提供安全措施。这些措施应该适用于对等环境，即每个蓝牙单元的鉴权和加密都以相同的方式实现。在链路层使用 4 种不同的实体来保证安全，每个用户都具有一个唯一的公共地址、两个字和一个随机数，此随机数在每个新的处理时都是不同的。

1. 蓝牙设备地址

蓝牙设备地址 (BD-ADDR) 是每个蓝牙单元唯一的 48 位 IEEE 地址。蓝牙地址是公开的，而且可经 MMI 交换，也可自动通过蓝牙单元查询规则获得。“字”在初始化时获得，并且不会被关闭。通常加密字在鉴权过程中从鉴权字获得。对于鉴权的算法，字的长度通常为 128 位；对于加密算法，字的长度可以在八进制 1~16 (8~128 位) 之间。加密字的长度以两个原则进行配置：首先，不同国家具有很多不同的适用于加密算法的要求，一般情况下，取决于出口规定和官方对于加密的态度；其次，就是使将来的安全升级很便利，没有必要对算法及加密硬件进行造价较高的重新设计。增加有效字的长度是适应计算功能增强的最简单的方式。目前加密的长度为 64 位，已经足以满足应用的保密要求。

加密字和鉴权字完全不同。每次加密被激活都要产生新的加密字，因此加密字的生命周期不必与鉴权字一致。从本质上说，鉴权字比加密字更具有静态特征，一旦建立加密字，则由运行在蓝牙设备上的特殊应用决定是否或何时改变加密字。要强调鉴权字对于特殊蓝牙链路的基本重要性，鉴权字常被当做连接字。

RAND 是一个取自蓝牙单元中的一个随机数或伪随机过程的随机数，不是一个静态参数，它经常会改变。

2. 随机数发生器

每个蓝牙单元都有一个随机数发生器。随机数在安全功能方面有很多用途，理想情况下，将使用一个真正的基于使用非连续随机物理过程的随机数发生器。由于实用的原因，一般使用基于随机数发生器的软件解决方案。总之，对伪随机序列的随机数分类是很困难的。在蓝牙中，使用随机数的要求是它们必须非重复并随机产生。“非重复”意味着在鉴权字生命周期里，此值不能重复。

3. 字管理

用户不能对特殊单元的加密字长进行设定，而必须由厂家预设。为了防止用户超出允许的字长，蓝牙基带进程不接受高层次软件层提供加密字。在需要一个新的加密字时，必须用加密算法来产生。改变连接字还应通过已定义的基带进程完成，根据连接字的类型，需要用不同的方式。

1) 字类型

连接字是长度为 128 位的随机数，由两个或更多部分共享，并且是这些部分安全处理事件的基础。连接字本身用于鉴权程序，当得到加密字时，连接字则作为参数之一。

会话期定义为单元作为一个特殊微微网成员的时间间隔，这样，当单元从微微网中解除连接时，会话期终止。

2) 字产生和初始化

连接字必须在蓝牙单元中产生和分配，在鉴权程序中使用。因而连接字必须保密，不能像获取蓝牙地址那样通过查询规则获得。字的互换发生在初始化阶段，对两个需要执行鉴权和加密的单元分开执行初始化。所有初始化进程包括 5 部分：初始化字的产生、鉴权、连接字的产生、交换连接字、在每个单元产生加密字。

完成初始化进程后，单元之间可以进行通信，也可以解除连接。如果要执行加密用于 E_0 算法，应选用由当前连接字产生的合适的加密字。对于许多新的在 A 和 B 单元之间的连接建立，在鉴权时将使用公用连接字。从特殊连接字中产生的新的加密字将在下一次加密过程中被激活。如果不能获得连接字，LM 将在初始化过程中自动启动。

4. 加密

可以通过对分组有效净荷加密来对用户信息进行保护，识别码和分组头不被加密，用 E_0 流密码对有效净荷进行加密，并且对每一个有效净荷进行重新同步，其原理如图 8-19 所示。流密码系统 E_0 由 3 部分组成：第一部分执行初始化，第二部分产生比特流的字，第三部分执行加密和解密。

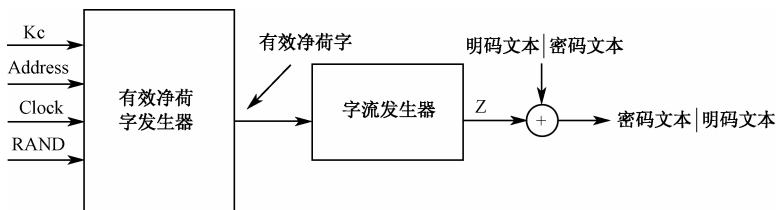


图 8-19 蓝牙 E_0 流加密

5. 鉴权

蓝牙实体的鉴权采用竞争-响应方案，在此方案中，客户方对密钥进行确定，使用对称密钥通过 2-move 协议进行校验，蓝牙竞争-响应过程示意图如图 8-20 所示。

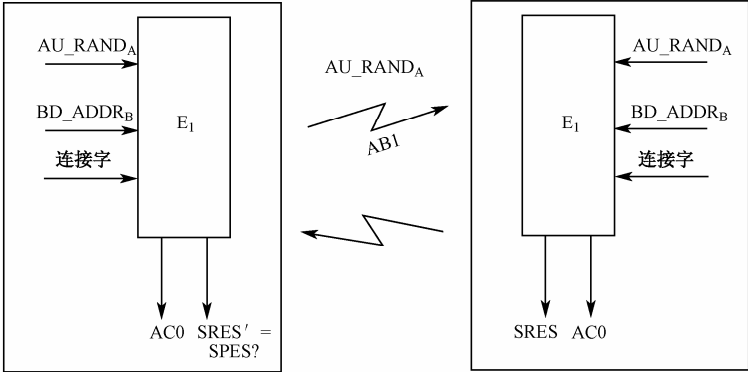


图 8-20 蓝牙竞争-响应过程示意图

8.5 蓝牙技术应用与产品开发

蓝牙技术可嵌入多种电子产品设备中，给人们带来操作简单、使用方便的便利生活和工作方式。

1. 蓝牙技术与 PC

蓝牙的规范接口可直接集成到笔记本电脑中，或者通过 PC 卡或 USB 接口连接。笔记本电脑的使用模型包括：通过蓝牙蜂窝电话连接远端网络，利用蓝牙蜂窝电话做扬声器，蓝牙笔记本电脑、手持机和移动电话间的商用卡交易，蓝牙笔记本电脑、手持机和移动电话间的时间同步等。

蓝牙是一个独立的操作系统，不与任何操作系统捆绑。适用于几种不同商用操作系统的蓝牙规范正在完善中。

2. 蓝牙技术与电话

蓝牙规范接口可以直接集成到蜂窝电话中或通过附加设备连接。电话的使用模型包括：通过蓝牙无线耳机实现电话的免提功能，与笔记本电脑和手持机的无电缆连接，与其他蓝牙电话、笔记本电脑和手持机的商用卡交易，与信任的蓝牙笔记本电脑或手持机自动同步地址簿。

3. 其他应用

其他蓝牙设备的使用模型包括：耳机、手持机和其他便携设备，人机接口设备，数据与语音接入点等。

8.6 习题

1. 填空题

(1) 蓝牙技术规范包括_____和应用规范两个部分。协议定义了各功能元素、_____和适配协议（L2CAP）等各自的工作方式，而应用规范则阐述了为实现一个特定的应用模型、_____机制。

(2) 蓝牙设备具有 3 种操作状态, 分别为_____、查询(Inquire)和_____。

(3) 蓝牙单元在连接状态下可以处于_____模式、呼吸(Sniff)模式、_____模式和待机(Park)模式等多种操作模式中。

(4) 虽然蓝牙的工作频带为全球开放, 但对于不同国家和地区, 其准确频率和频带宽度有所不同。在美国和欧洲大部分地区, 使用带宽为_____MHz, 其中定义了_____个射频信道, 每个信道(频隙)带宽_____MHz。在日本、西班牙和法国, 带宽有所减小, 定义了_____个射频信道, 每信道带宽_____MHz。

(5) 蓝牙的物理信道可以是_____, 也可以是频隙。

(6) 在蓝牙系统中, 定义了_____信道、链路管理(LM)信道、用户异步数据(UA)信道、_____信道和用户同步(US)信道 5 种逻辑信道。

2. 是非判断题(正确画√, 错误画×)

(1) 蓝牙设备地址(BD-ADDR)是每个蓝牙单元唯一的 48 位 IEEE 地址。蓝牙地址是公开的, 而且可经 MMI 交换, 也可自动通过蓝牙单元查询规则获得。()

(2) 信道是信息传输的基础, 可分为物理信道和逻辑信道。只有形成传输链路, 才能保证信息的安全可靠传输。()

(3) 蓝牙技术提供短距离的对等通信。为了提供应用保护和信息保密, 系统必须在应用层和链路层提供安全措施。()

3. 选择题(将正确答案的序号填入括号内)

(1) 蓝牙工作在()的 ISM 频带。

A. 2.4GHz B. 1.8GHz C. 0.9GHz D. 6GHz

(2) 蓝牙的一个时隙长度为()。

A. 125μs B. 25μs C. 60ms D. 625μs

4. 简答题

(1) 蓝牙技术有哪些主要特点?

(2) 蓝牙协议体系中的协议分为哪 4 类? 各自的作用是什么?

(3) 结合图 8-2, 说明蓝牙规范的 4 种应用模式的作用。

5. 画图题

画出蓝牙协议结构示意图, 说明它们之间功能的关系。

>>> 调研项目: 我国蓝牙技术的发展与现状



调研目的:

1. 通过调研, 了解我国蓝牙技术的总体发展过程及现状。

2. 了解目前我国蓝牙通信技术水平及其应用状况。

3. 增强对蓝牙通信技术的感性认识, 提高读者学习蓝牙技术的积极性, 了解蓝牙技术在通信领域中的地位和作用。



调研要求:

1. 在调研的基础上, 要按统一要求格式撰写 5 000 字左右的《我国蓝牙技术的发展与现状》调查研究报告。
2. 调研资料要真实、可靠, 论证要清晰、准确。报告中, 在简述我国蓝牙通信技术的发展历程的基础上, 重点阐述当前我国蓝牙通信的应用技术及其影响, 最后简要介绍其发展趋势。



提示:

可利用图书馆、互联网等查阅有关资料, 在有条件的情况下, 可到有关科研院所、企业、公司进行调研。

>>> 实验 8 蓝牙通信实验



实验目的:

1. 学习和掌握内核驱动程序的配置。
2. 通过实验学习交叉编译应用程序。
3. 通过实验学习和掌握蓝牙的无线通信的基本原理。



实验原理:

蓝牙的无线通信技术采用每秒 1 600 次的快跳频和短分组技术, 减少干扰和信号衰落, 保证传输的可靠性; 以时分方式进行全双工通信, 传输速率设计为 1MHz; 采用前向纠错 (FEC) 编码技术, 减小远距离传输时的随机噪声影响; 其工作频段为非授权的工业、医学、科学频段 (2.4GHz 的 ISM 频段), 保证能在全全球范围内使用这种无线通用接口和通信技术; 语音采用抗衰落能力很强的连续可变斜率调制 (CVSD) 编码方式, 以提高语音质量; 采用频率调制方式, 降低设备的复杂性。



实验内容:

1. 对 Linux 的内核加入, 对蓝牙 BlueZ 协议栈的配置。
2. 交叉编译蓝牙 BlueZ 库文件和工具集。



实验方法:

1. 课前仔细阅读实验指导书，掌握移动通信设备的面板结构，了解有关测量仪器的使用方法。
2. 根据实验指导书的说明，结合实验设备，在老师的指导下，进行实验数据的测量。
3. 注意实验过程中观察到的现象，做好记录，并进行分析。

参考文献

- [1] 李建东, 郭梯云, 邬国扬. 移动通信 (第四版) [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2007.
- [2] 李斯伟, 贾璐, 杨艳. 移动通信技术. [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [3] 啜钢, 王文博, 常永宇, 全庆一. 移动通信原理与系统 (第 2 版) [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2009.
- [4] 吴伟陵, 牛凯. 移动通信原理 (第 2 版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [5] 孙龙杰, 刘立康. 移动通信技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [6] 韦惠民, 李国民, 暴宇. 移动通信技术 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006.
- [7] 樊昌信, 曹丽娜. 通信原理 (第 6 版) [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [8] 朱刚, 等. 蓝牙技术原理与协议 [M]. 北京: 北方交通大学出版社, 2003.
- [9] 严紫建, 刘元安. 蓝牙技术 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2001.
- [10] 廖晓滨, 赵熙. 第三代移动通信网络系统技术与应用基础教程 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [11] 吴伟陵, 牛凯. 移动通信原理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [12] 李天文, 等. GPS 原理及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [13] 张勤, 李家权, 等. GPS 测量原理及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.